



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΩΡΟΤΑΞΙΑΣ, ΠΟΛΕΟΔΟΜΙΑΣ &
ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΑΚΗΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ
**ΠΜΣ: ΧΩΡΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ
ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**

ΘΕΜΑ:

**Ανάλυση μικρομετακινήσεων λόγω σεισμικής δραστηριότητας της
νήσου Κεφαλονιάς με διαφορική συμβολομετρία**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Της

Χριστίνας Σ. Θεοδωράτου

Επιβλέπων: Κωνσταντίνος Περάκης
Καθηγητής Π.Θ.

ΒΟΛΟΣ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2018



UNIVERSITY OF
THESSALY

DEPARTMENT OF PLANNING AND REGIONAL DEVELOPMENT

**MASTER IN SPATIAL ANALYSIS AND ENVIRONMENTAL
MANAGEMENT**

MASTER THESIS:

**Differential interferometry land deformation analysis in Cephalonia
due to seismic activity**

BY

Christina S. Theodoratou

Supervisor: Prof. Konstantinos Perakis

VOLOS, JUNE 2018

Δήλωση

Βεβαιώνω ότι η παρούσα εργασία είναι δική μου, δεν έχει συγγραφεί από άλλο πρόσωπο με ή χωρίς αμοιβή, δεν έχει αντιγραφεί από δημοσιευμένη ή αδημοσίευτη εργασία άλλου και δεν έχει προηγουμένως υποβληθεί για βαθμολόγηση στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας ή αλλού. Βεβαιώνω ότι είμαι εν γνώσει των κανόνων περί λογοκλοπής του ΤΜΧΠΠΑ και ότι στο πλαίσιο αυτού έχουν τηρηθεί όλοι οι κανόνες κατά την ακαδημαϊκή δεοντολογία, σχετικά με αναφορές, βιβλιογραφία, κλπ., τόσο από έντυπες όσο και από ηλεκτρονικές πηγές. Σε περίπτωση λογοκλοπής αποδέχομαι όλες ανεξαιρέτως τις ποινές που προβλέπουν οι εκάστοτε Κανονισμοί του ΠΘ ή και του ΤΜΧΠΠΑ.

Ημερομηνία: 27/06/2018

Ονοματεπώνυμο: ΘΕΟΔΩΡΑΤΟΥ ΧΡΙΣΤΙΝΑ

Υπογραφή:

Πρόλογος-Ευχαριστίες

Η παρακάτω διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια ολοκλήρωσης των σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανικών Πολεοδομίας, Χωροταξίας, και Περιφερειακής Ανάπτυξης του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας.

Στόχος της εργασίας είναι η κατανόηση της Συμβολομετρικής μεθόδου, εξαγωγή χαρτών εδαφικής παραμόρφωσης και η εξαγωγή διαγραμμάτων διαχρονικής παραμόρφωσης για την περιοχή της νήσου Κεφαλονιάς κατά την περίοδο 2015-2016.

Πρωτίστως θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την οικογένεια μου για την ψυχολογική και υλική υποστήριξη τους κατά την διάρκεια των σπουδών μου καθώς και την συνάδελφο Βιργινία – Μαρία Καραπατή, χωρίς την βοήθεια των οποίων θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνάδελφο κ. Βασίλειο Λέτσιο για την βοήθεια που μου προσέφερε και τον κ. Κωνσταντίνο Περάκη, καθηγητή ΤΜΧΠΠΑ για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου για την ανάθεση και επίβλεψη της διπλωματικής.

Περίληψη

Οι υψομετρικές παραμορφώσεις του εδάφους που οφείλονται είτε σε φυσικά φαινόμενα (όπως κατολισθήσεις, σεισμική δραστηριότητα, εκρήξεις ηφαιστείων, κλπ.) είτε σε ανθρωπογενείς δραστηριότητες (όπως εξορύξεις ορυχείων, κατασκευή έργων υποδομής, απαντλήσεις υδάτων, κλπ.), είναι δυνατόν να εντοπισθούν και να ερμηνευτούν μέσω της Διαφορικής Συμβολομετρίας (DInSAR).

Η ευρύτερη περιοχή του Ιονίου Πελάγους χαρακτηρίζεται από έντονη σεισμική δραστηριότητα με τις δονήσεις να είναι συχνές άλλοτε έντονες και καταστροφικές και άλλοτε ήπιες. Υπεύθυνο για την συνεχιζόμενη σεισμική δραστηριότητα είναι το Ελληνικό Τόξο το οποίο εκτείνεται στα νησιά Ρόδο, Κάρπαθο, Κρήτη και Κύθηρα και έχει δημιουργηθεί λόγω της σύγκλισης της Ευρασιατικής με την Αφρικανική πλάκα. Επομένως το νησί της Κεφαλονιάς δικαίως θεωρείται κρίσιμη περιοχή αναφορικά με την τεκτονική δραστηριότητα. Το σύνολο των δεδομένων αποκτήθηκε μέσω της εφαρμογής του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος (ESA) και η επεξεργασία τους πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό ανοικτού κώδικα SNAP το οποίο διατίθεται από την ίδια υπηρεσία.

Η παρούσα εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα από την επεξεργασία των δεδομένων που ελήφθησαν κατά την χρονική περίοδο 2015-2016 αμέσως μετά την ακολουθία δύο ισχυρών σεισμικών δονήσεων που πραγματοποιήθηκαν στις 26 Ιανουαρίου 2014 και στις 3 Φεβρουαρίου 2014 στο νησί της Κεφαλονιάς.

Abstract

The Earth crust deformation is caused either by natural causes (e.g. landslides, earthquakes, volcano explosions, etc.) or by human activity (e.g. underground mining, construction of infrastructure projects, water pumping, etc.) can now be identified and interpreted through Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry (DInSAR).

The region of the Ionian Sea is well known for the intense seismic activity that is sometimes strong and catastrophic and other times are mild. The continued seismic activity is generated by the Greek Arc which expands towards the islands of Rhodes, Karpathos, Crete and Kithira and it is caused by the subduction of the African plate by the Eurasian plate. Therefore Cephalonia is considered crucial region concerning tectonic activity.

All of the data used in this thesis were obtained through the implementation of the European Space Agency (ESA) and was processed with SNAP, open source software available from the same service.

The thesis aims to introduce the results of the processing data obtained during the period 2015-2016 immediately after the two powerful seismic vibrations that took place on January 26, 2014 and February 3, 2014 on the island of Cephalonia.

Λέξεις-Κλειδιά: Ραντάρ, Συμβολομετρία, παραμορφώσεις, SAR, Κεφαλονιά, σεισμός.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγή.....	9
1 Ραντάρ.....	10
1.1 Σύστημα Ραντάρ.....	10
1.1.1 Δορυφορικοί Αισθητήρες.....	11
1.1.2 Οπισθοσκεδαζόμενη Ακτινοβολία.....	13
2 Λειτουργία SAR.....	13
2.1 Συμβολομετρία.....	15
2.1.1 Γεωμετρία απεικονίσεων SAR.....	15
2.2 Βήματα της Συμβολομετρικής Διαδικασίας.....	16
2.3 Τεχνικές και Είδη Συμβολομετρίας Ραντάρ.....	20
2.3.1 Τεχνικές Συμβολομετρίας Ραντάρ.....	20
2.3.2 Είδη Συμβολομετρίας Ραντάρ.....	20
2.4 Εφαρμογές Συμβολομετρίας.....	22
2.5 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Συμβολομετρία.....	24
3 Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος / SAR.....	25
3.1 Απεικονίσεις Συνθετικού Ανοίγματος.....	26
3.2 Παράγοντες που Επηρεάζουν τις απεικονίσεις SAR.....	27
4 Περιοχή Μελέτης.....	27
4.1 Τεκτονική του Ελλαδικού χώρου.....	27
4.2 Περιοχή Μελέτης.....	29
4.3 Το χρονικό των σεισμικών δονήσεων στην περιοχή.....	31
5 Μεθοδολογία.....	37
5.1 Συλλογή δεδομένων.....	37
5.2 Επεξεργασία δεδομένων.....	39
5.2.1 Εισαγωγή των δεδομένων.....	39
5.2.2 Ανάλυση δεδομένων.....	41
5.2.3 Συμπροσαρμογή των εικόνων.....	43
5.2.4 Δημιουργία συμβολογράμματος και απομάκρυνση του όρου της τοπογραφίας	45
5.2.5 Ξετύλιγμα της φάσης και παραγωγή μετατοπίσεων.....	48
6 Συμπεράσματα.....	51
Βιβλιογραφία.....	52

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 - Αρχή λειτουργίας συστήματος ραντάρ.....	10
Εικόνα 2.1- Γεωμετρία της γήινης επιφάνειας	14
Εικόνα 2.2 – Διαπερατότητα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας	14
Εικόνα 2.3 - Γεωμετρία συμβολομετρικού συστήματος SAR	16
Εικόνα 2.4 - Αναπαράσταση διαδικασίας συμβολομετρικής φάσης.....	18
Εικόνα 2.5 – Across-track interferometry	21
Εικόνα 2.6- Along-track interferometry	21
Εικόνα 2.7 - Ψηφιακό μοντέλο εδάφους που δείχνει τον ρυθμό μετατοπίσεων στην επαρχία Carajas, Brazil	23
Εικόνα 4.1- Η καταβύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική	28
Εικόνα 4.2- Κατολίσθηση πλαγιάς λόγω σεισμού	29
Εικόνα 4.3- Χάρτης της Ελλάδας.....	30
Εικόνα 4.4 - Το Αργοστόλι μετά τον σεισμό της 12ης Αυγούστου 1953	31
Εικόνα 4.5 - Η Ζάκυνθος μετά τον σεισμό της 12ης Αυγούστου 1953.....	32
Εικόνα 4.6- Χάρτης κύριων σεισμικών δονήσεων	33
Εικόνα 4.7- Χάρτης επικέντρων σεισμικών δονήσεων	34
Εικόνα 4.8 - Ρήγμα στο λιμάνι του Ληξουρίου	35
Εικόνα 4.9- Η διάσημη παραλία του Μύρτου μετά την κατολίσθηση.....	35
Εικόνα 4.10 - Χάρτης σεισμικών δονήσεων κατά την υπό μελέτη περίοδο	36
Εικόνα 4.11- Επεξηγηματικός πίνακας στοιχείων σεισμικών δονήσεων.....	37
Εικόνα 5.1- Πλατφόρμα παραγγελίας εικόνων ραντάρ	38
Εικόνα 5.2- Στοιχεία ζεύγους εικόνων	40
Εικόνα 5.3 - Πρώτο στάδιο επεξεργασίας με εφαρμογή Συμβολομετρίας InSAR	41
Εικόνα 5.4 - Δεύτερο στάδιο επεξεργασίας με εφαρμογή Διαφορικής Συμβολομετρίας DInSAR.....	42
Εικόνα 5.5 - Τρίτο στάδιο εξαγωγής των τιμών μετατοπίσεων	43
Εικόνα 5.6- Χάρτης συνάφειας εικόνων	44
Εικόνα 5.7- Εικόνα RGB.....	45
Εικόνα 5.8- Συμβολόγραμμα.....	46
Εικόνα 5.9- Ιστόγραμμα συνάφειας	46
Εικόνα 5.10- Συμβολόγραμμα έπειτα από εφαρμογή φίλτρου και αφαίρεση της τοπογραφικής φάσης.....	47
Εικόνα 5.12- Ιστόγραμμα τιμών μετατόπισης.....	49
Εικόνα 5.13- Εδαφικές μικρομετακινήσεις	49

Εισαγωγή

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως αντικείμενο την μελέτη εδαφικής παραμόρφωσης της νήσου Κεφαλονιάς, μια περιοχή με έντονη σεισμική δραστηριότητα λόγω του ελληνικού τόξου, το οποίο τείνει να προκαλεί σύγκλιση της Ευρασιατικής πλάκας με την Αφρικανική πλάκα.

Η εξέλιξη της δορυφορικής τηλεπισκόπησης τα τελευταία χρόνια έχει συντελέσει στην εφαρμογή νέων μεθόδων μελέτης των επιφανειακών παραμορφώσεων του εδάφους. Η δορυφορική τηλεπισκόπηση εφαρμόζεται στις επιστήμες της γεωλογίας, της σεισμολογίας, της δασολογίας, της τοπογραφίας κα. Η πληροφορία που συλλέγεται μέσα από την ανάλυση των νέων μεθόδων βοηθά σημαντικά στην κατανόηση των φυσικών φαινομένων.

Στόχοι της εργασίας είναι:

- Η μελέτη της θεωρίας της Συμβολομετρίας
- Η εξοικείωση με την επεξεργασία απεικονίσεων Ραντάρ
- Η εξοικείωση με το πρόγραμμα SNAP
- Η εξαγωγή δεδομένων που αφορούν την ταχύτητα παραμόρφωσης της νήσου Κεφαλονιάς
- Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται η εισαγωγή στην επιστήμη της δορυφορικής τηλεπισκόπησης. Αναλύεται η λειτουργία ενός συστήματος Ραντάρ και η γεωμετρία των απεικονίσεων SAR.

Στο δεύτερο κεφάλαιο αναλύεται η έννοια του Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος και οι ιδιότητες του.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται παρουσιάζεται η τεκτονική του ελλαδικού χώρου και ειδικότερα το τεκτονικό καθεστώς της περιοχής μελέτης.

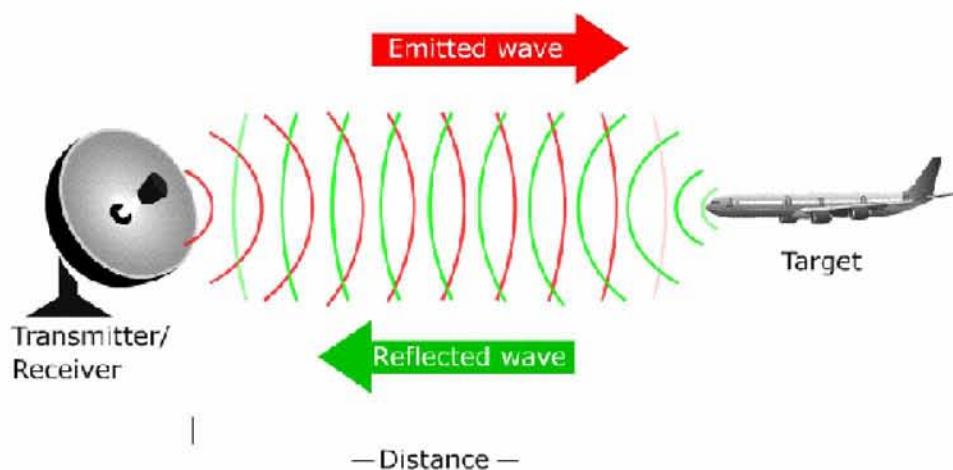
Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα και το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε. Αναλύονται όλα τα βήματα επεξεργασίας των απεικονίσεων SAR.

Τέλος, κλείνοντας το πέμπτο κεφάλαιο γίνεται ερμηνεία των αποτελεσμάτων της μελέτης.

1 Ραντάρ

1.1 Σύστημα Ραντάρ

Τα συστήματα ραντάρ αποτελούν ενεργά συστήματα και καταγράφουν τα δεδομένα ανιχνεύοντας τα ποσά ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που επιστρέφουν από τους στόχους. Λειτουργούν στην ζώνη των μικροκυμάτων μεταξύ 200MHz – 40GHz. Έχουν την δυνατότητα να καταγράφουν δεδομένα από μεγάλη απόσταση με υψηλή χωρική ανάλυση. Ένα σύστημα Ραντάρ αποτελείται από έναν πομπό ο οποίος εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με την μορφή δέσμης ακτινοβολίας και καταγράφει το ποσό της ανακλώμενης από τους στόχους ακτινοβολία (Εικόνα 1.1). Η γωνία διεύθυνσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μπορεί να ρυθμιστεί κατάλληλα ώστε το παραγόμενο προϊόν να μας δίνει περισσότερα χαρακτηριστικά των στόχων, μικροκυματική ακτινοβολία σε συγκεκριμένη συχνότητα προς την επιφάνεια της γης.



Εικόνα 1.1 - Αρχή λειτουργίας συστήματος ραντάρ (www.google.gr)

Οι στόχοι που βρίσκονται στην επιφάνεια της γης ανακλούν την προσπίπτουσα ακτινοβολία και ο δέκτης του Ραντάρ καταγράφει την ακτινοβολία που επιστρέφει στο σύστημα. Η απόσταση των στόχων από το σύστημα ραντάρ καθώς και η γεωγραφική τους θέση προκύπτουν αν υπολογίσουμε τον χρόνο που χρειάζεται η ακτινοβολία να επιστρέψει στον δέκτη μετά την ανάκλαση της. Συγκεκριμένα, ο προσδιορισμός της γεωγραφικής θέσης του στόχου υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας τον χρόνο διάδοσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ταχύτητα αυτής.

Πλεονεκτήματα ενός συστήματος Ραντάρ αποτελούν:

- α) Η δυνατότητα λήψης εικόνων ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών και,
- β) Η λειτουργία στις ζώνες των μικροκυμάτων και των ραδιοφωνικών κυμάτων.

Στον αντίποδα, μειονεκτήματα ενός συστήματος Ραντάρ αποτελούν:

- α) Η χρήση πολύπλοκων και χρονοβόρων λογισμικών για την επεξεργασία των δεδομένων,
- β) Η χρήση εξειδικευμένου εξοπλισμού για την ανάλυση των δεδομένων,

1.1.1 Δορυφορικοί Αισθητήρες

Οι δορυφορικοί αισθητήρες ουσιαστικά συλλέγουν και μετρούν το ποσοστό της ανακλώμενης ακτινοβολίας και το μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα.

Λόγω της μικρής ατμοσφαιρικής απορρόφησης και σκέδασης στην ζώνη των μικροκυμάτων, οι αισθητήρες ενός συστήματος Ραντάρ δεν είναι ευαίσθητοι στις καιρικές συνθήκες. Η ικανότητα διείσδυσης της μικροκυματικής ακτινοβολίας αυξάνεται με το μήκος κύματος (Φουμέλης, 2009).

Οι δορυφορικοί αισθητήρες διακρίνονται σε (Διάγραμμα 1):

- α) Οι παθητικοί αισθητήρες (passive sensors) καταγράφουν την ακτινοβολία που εκπέμπεται ή ανακλάται από στόχο. Λειτουργούν από τα φάσμα των πολύ μικρών μηκών κυμάτων έως το μακρινό υπέρυθρο.
- β) Οι ενεργητικοί δορυφορικοί αισθητήρες (active sensors) καταγράφουν την ανακλώμενη ακτινοβολία που στέλνουν στον στόχο. Λειτουργούν στο φάσμα των μικροκυμάτων και βασικό πλεονέκτημα τους αποτελεί ότι το σήμα που επιστρέφεται δίνει όλα τα χαρακτηριστικά και της ιδιότητες της επιφάνειας που στοχεύει.
- γ) Οι ανεικονιστές (non-imaging sensors) μετατρέπουν σε ηλεκτρικό σήμα την ακτινοβολία που εκπέμπεται από τους στόχους με κύριο μειονέκτημα την μη καταγραφή των διαφόρων σημείων του στόχου. Στους ενεργητικούς δορυφορικούς αισθητήρες είναι δυνατόν να μετρηθεί το υψόμετρο των στόχων και στους παθητικούς δορυφορικούς αισθητήρες είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ακτινοβολία που εκπέμπεται και ανακλάται από το σύστημα ραντάρ με την χρήση του μικροκυματικού ραδιόμετρου.
- δ) Οι απεικονιστές (imaging sensors) λειτουργούν σε δύο διαστάσεις και η παραγόμενη εικόνα δημιουργείται βάση της ανακλώμενης από κάθε στόχο ακτινοβολίας. Στους ενεργούς δορυφορικούς αισθητήρες ανήκει το Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος και στους παθητικούς δορυφορικούς αισθητήρες ανήκει ο οπτικός μηχανικός σαρωτής.
- ε) Τα συστήματα πλαισίου (framing or non-scanning systems) ανάλογα με το είδος των οπτικών μερών του συστήματος, μετρούν την στιγμιαία ακτινοβολία όλης της υπό μέτρησης σκηνής.
- στ) Οι σαρωτές (scanning systems) χωρίζουν την περιοχή μελέτης σε ένα είδος κανάβου και σαρώνουν όλη την έκταση κατά μήκος των διαδοχικών λωρίδων που δημιουργούνται.



Διάγραμμα 1 – Ταξινόμηση δορυφορικών αισθητήρων (ιδία επεξεργασία)

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των δορυφορικών αισθητήρων είναι τα εξής:

α) Η χωρική διακριτική ικανότητα (Spatial Resolution) η οποία είναι ίση με την μικρότερη αναγκαία απόσταση μεταξύ δύο αντικειμένων ώστε αυτά να διακρίνονται. Εξαρτάται από το μήκος κύματος της προσλαμβανόμενης ακτινοβολίας και είναι αντιστρόφως ανάλογη της απόστασης του δορυφόρου από τον στόχο. Όσο αυξάνεται η απόσταση από τον στόχο τόσο μικρότερη η χωρική διακριτική ικανότητα, καθώς είναι δυσκολότερη η διάκριση μεταξύ των αντικειμένων που στοχεύονται.

β) Η φασματική διακριτική ικανότητα (Spectral Resolution) εξυπηρετεί στον διαχωρισμό των διαφορετικών επιφανειών που αποτυπώνονται στην εικόνα. Είναι αντιστρόφως ανάλογη με το εύρος της περιοχής που καταγράφεται στο κανάλι. Όσο μεγαλύτερη η φασματική διακριτική ικανότητα τόσο μικρότερο το εύρος της περιοχής που καταγράφεται. Ο διαχωρισμός των διαφορετικών επιφανειών επιτυγχάνεται με την ερμηνεία της φασματικής υπογραφής τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι περιοχές με έντονη την παρουσία βλάστησης και νερού όπου μέσω της φασματικής υπογραφής μπορούμε άμεσα να αντιληφθούμε το είδος τους.

γ) Η χρονική διακριτική ικανότητα (Temporal Resolution) εξαρτάται από την τροχιά του κάθε δορυφόρου σε σχέση με την συχνότητα λήψης των εικόνων για την ίδια περιοχή. Ιδιαίτερα σε μελέτες μεταβολών της γήινης επιφάνειας, στην μετεωρολογία, στην σεισμολογία κ.α., η χρονική διακριτική ικανότητα αποτελεί τον σημαντικότερο παράγοντα εξαγωγής ορθών αποτελεσμάτων.

δ) Η ραδιομετρική διακριτική ικανότητα (Radiometrical Resolution) ανιχνεύει τις διαφορές στην ισχύ του σήματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

1.1.2 Οπισθοσκεδαζόμενη Ακτινοβολία.

Η ακτινοβολία που ανακλάται από τον στόχο και επιστρέφει στον αισθητήρα ορίζεται ως οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία. Ουσιαστικά, η ακτινοβολία τροποποιείται κατά την ανάκλαση στον στόχο με αποτέλεσμα το σήμα που επιστρέφει στον αισθητήρα να φέρει πληροφορίες σχετικά με την γεωμετρία και τα διηλεκτρικά χαρακτηριστικά του στόχου.

Η οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία μετράται με τον συντελεστή οπισθοσκέδασης σ_0 και δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_0(dB) = 10 \log_{10}(\text{αναλογία ενέργειας})$$

$$\text{όπου, αναλογία ενέργειας} = \frac{\text{ενέργεια που λαμβάνεται από τον δέκτη}}{\text{ενέργεια που ανακλάται κατά τρόπο ισότροπο}}$$

Η ένταση της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας επηρεάζεται κυρίως από την τραχύτητα της επιφάνειας. Όσο μεγαλύτερη η τραχύτητα της επιφάνειας τόσο μεγαλύτερη η οπισθοσκέδαση, ενώ όσο μικρότερη η οπισθοσκέδαση τόσο μεγαλύτερο το ποσοστό ακτινοβολίας ανακλάται μακριά από το ραντάρ.

Επιπλέον παράμετροι που επηρεάζουν την ένταση της οπισθοσκεδαζόμενης ακτινοβολίας είναι οι εξής:

- α) Χαρακτηριστικά ενός συστήματος Ραντάρ: η συχνότητα f , η πόλωση p και η γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας.
- β) Χαρακτηριστικά της επιφάνειας του στόχου: γεωμετρία και διηλεκτρικές ιδιότητες του στόχου.

Η υψηλή οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία αποδίδεται με ανοικτούς τόνους του τέφρου ανάλογα με την τραχύτητα του εδάφους και την πυκνότητα της βλάστησης (για παράδειγμα ανθρωπογενείς κατασκευές και ορεινοί όγκοι).

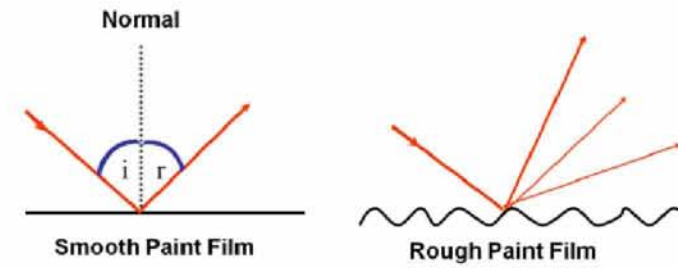
Η μέτρια οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία αποδίδεται με ενδιάμεσες διαβαθμίσεις του τέφρου (για παράδειγμα καλλιεργούμενες εκτάσεις μέτριας τραχύτητας).

Η χαμηλή οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία αποδίδεται με μαύρο χρώμα (για παράδειγμα υδάτινες επιφάνειες και ξηρό έδαφος).

2 Λειτουργία SAR

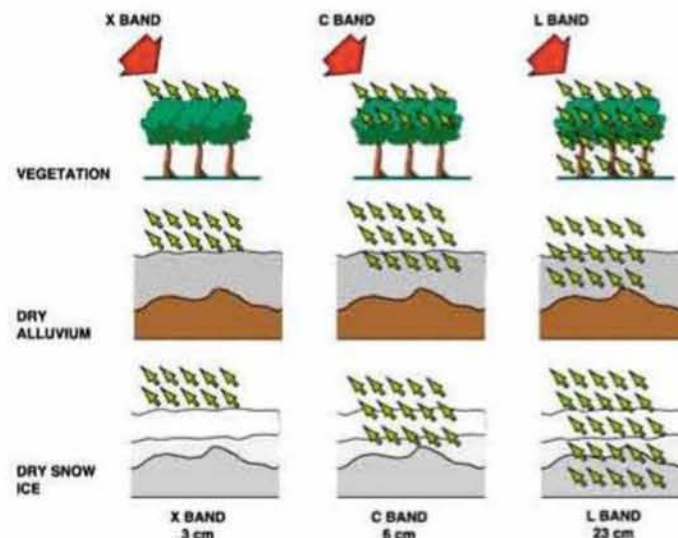
Εκπέμπεται ηλεκτρομαγνητική μικροκυματική ακτινοβολία η οποία κυμαίνεται σε μήκη κύματος από 1mm έως 1m. Η ακτινοβολία προσπίπτει ή ανακλάται σε μία επιφάνεια και λειτουργεί στις φασματικές ζώνες των ραδιοφωνικών κυμάτων και των μικροκυμάτων. Κατά την εκπομπή της ακτινοβολίας από τον δορυφόρο, μπορούν να προκύψουν διάφορα ζητήματα λόγω της αλληλεπίδραση με την ύλη:

α) Η γεωμετρία της επιφάνειας της γης είναι δυνατόν να προκαλέσει το φαινόμενο της κατοπτρικής ανάκλασης και της διάχυσης (Εικόνα 2.1). Η διηλεκτρική σταθερά μπορεί να προκαλέσει σκέδαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε υδάτινες επιφάνειες, σε επιφάνειες με υγρασία και σε επιφάνειες με έντονη βλάστηση.



Εικόνα 2.1- Γεωμετρία της γήινης επιφάνειας (www.google.gr)

β) Η διαπερατότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας επηρεάζει την απορρόφηση αυτής σε επιφάνειες όπως ξηρό έδαφος και χιόνι. Οι επιφάνειες αυτές έχουν μικρή περιεκτικότητα σε νερό οπότε επιτρέπουν στην ακτινοβολία να εισχωρήσει σε βαθύτερα στρώματα (Εικόνα 2.2).



Εικόνα 2.2 – Διαπερατότητα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (www.google.gr)

γ) Ανεξαρτήτως καιρικών συνθηκών, αιωρούμενων σωματιδίων και ουσιών που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα, η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία επηρεάζεται ελάχιστα καθώς εκπέμπεται σε μεγάλο μήκος κύματος με αποτέλεσμα να μην σκεδάζεται.

δ) Είναι δυνατόν οι στόχοι οι οποίοι βρίσκονται στην επιφάνεια της γης να εκπέμπουν μικροκυματική ακτινοβολία η οποία εξαρτάται από την θερμοκρασία, το είδος του υλικού και την υγρασία του στόχου. Στόχοι οι οποίοι έχουν μικρή περιεκτικότητα σε νερό έχουν μικρότερη ικανότητα εκπομπής μικροκυματικής ακτινοβολίας. Όταν η γωνία παρατήρησης είναι διαφορετική από την κατακόρυφη διεύθυνση, η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι

πολωμένη. Η πόλωση της ακτινοβολίας εξαρτάται από την τραχύτητα του στόχου. Όσο αυξάνεται η τραχύτητα του στόχου, τόσο μεγαλύτερο ποσοστό ακτινοβολίας επιστρέφει στον αισθητήρα. Αντίθετα, μια λεία επιφάνεια επιστρέφει αρκετά μειωμένη ακτινοβολία στον αισθητήρα καθώς η ακτινοβολία μεταδίδεται σε σταθερή κατεύθυνση.

2.1 Συμβολομετρία

Σημαντικό πλεονέκτημα της μεθόδου αυτής είναι το χαμηλό κόστος εφαρμογής της καθώς δεν είναι απαραίτητη η πρόσβαση και η εγκατάσταση στην περιοχή μελέτης. Η χρήση της μικροκυματικής ακτινοβολίας έδωσε την δυνατότητα εξερεύνησης των παραμορφώσεων του εδάφους και παραγωγής χαρτών και ψηφιακών μοντέλων εδάφους πολύ καλής κλίμακας.

2.1.1 Γεωμετρία απεικονίσεων SAR.

Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζεται η γεωμετρία ενός συστήματος απεικονίσεων SAR. Η απόσταση B που δημιουργείται μεταξύ των δύο τροχιών του δορυφόρου κατά την λήψη απεικόνισης αποτελεί την συμβολομετρική γραμμή. Είναι ουσιαστικά το διάνυσμα βάσης και αναλύεται σε δύο συνιστώσες. Η κάθετη B_n είναι η πρώτη συνιστώσα και η δεύτερη είναι η παράλληλη προς την διεύθυνση της απόστασης της απεικόνισης. Η απεικόνιση του δορυφόρου 1 ονομάζεται κύρια (master) και η απεικόνιση του δορυφόρου 2 ονομάζεται δευτερεύουσα (slave). Η τιμή του εικονοστοιχείου της κάθε εικόνα περιέχει την πληροφορία της φάσης και του εύρους και δίνεται από τον τύπο:

$$z(x, y) = l(x, y)e_{i\varphi(x, y)},$$

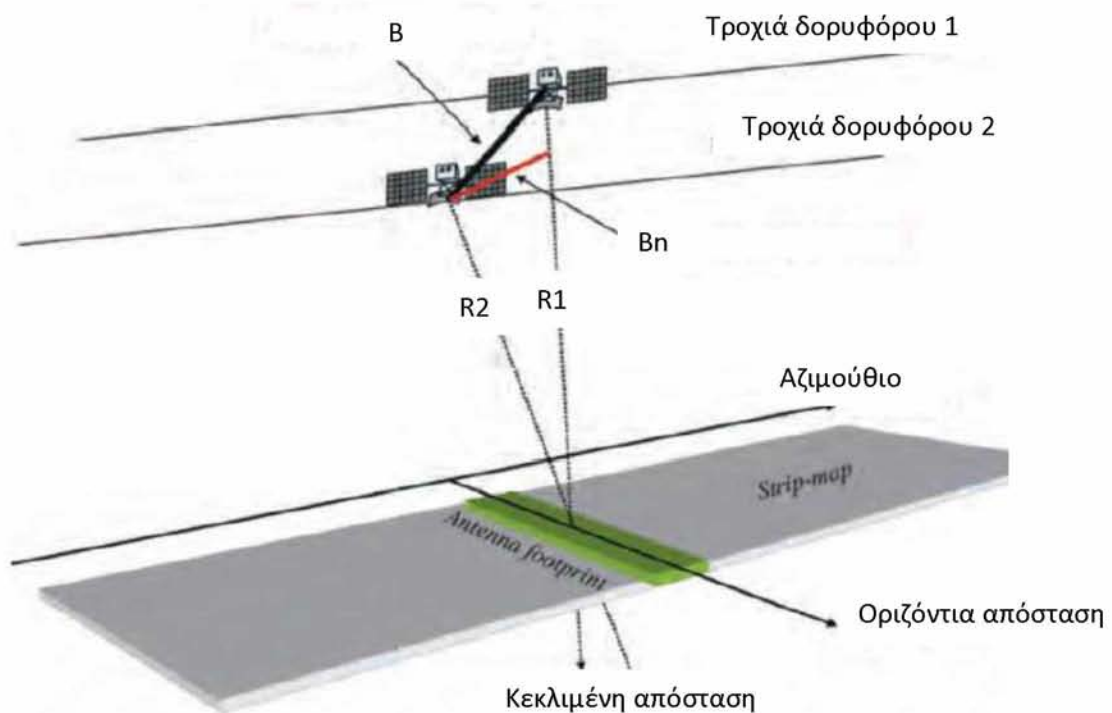
όπου: (x, y) : οι συντεταγμένες του εικονοστοιχείου,

z : η μιγαδική τιμή του εικονοστοιχείου,

l : το εύρος του σήματος,

Φ : η φάση του ανακλώμενου σήματος,

i : η φανταστική μονάδα $\sqrt{-1}$



Εικόνα 2.3 - Γεωμετρία συμβολομετρικού συστήματος SAR (Τροποποιημένη. Παρχαρίδης, 2014)

2.2 Βήματα της Συμβολομετρικής Διαδικασίας.

Στην συμβολομετρική διαδικασία πρέπει να ακολουθούνται συγκεκριμένα βήματα ώστε το τελικό παραγόμενο προϊόν να είναι ορθό και απαλλαγμένο από σφάλματα.

Προεπεξεργασία απεικονίσεων SAR.

Γίνεται προεπεξεργασία και αξιοποίηση των πρωτογενών δεδομένων (raw data) της εικόνας ώστε να παραχθεί η εικόνα SLC (Single Look Complex) η οποία διατηρεί την πληροφορία της φάσης. Στην συνέχεια, οι νέες εικόνες SLC βελτιώνονται ως προς την ραδιομετρική ανάλυση και μειώνεται ο θόρυβος.

Διάνυσμα Βάσης.

Το διάνυσμα βάσης ορίζει την απόσταση μεταξύ των στιγμιαίων θέσεων των δύο κεραίων. Είναι εξαιρετικά σημαντικό καθώς καθορίζει την συνέχιση ή όχι της συμβολομετρικής διαδικασίας. Ορίζεται είτε βάση της διαφοράς θέσεις των δύο κεραίων είτε μεταξύ των τροχιών του δορυφόρου. Ο σωστός υπολογισμός του διανύσματος της βάσης προϋποθέτει

την γνώση της θέσεις του συστήματος Ραντάρ καθώς και την κινηματική συμπεριφορά αυτών (γωνίες Pitch, Roll και Azimuth ή Heading) (Γκέντσος, 2017).

Το διάνυσμα βάσης υπολογίζεται με τους εξής τρόπους:

- α) Με την χρήση σημείων με γνωστές συντεταγμένες (Ground Control Points/G.C.P).
- β) Με βάση την αναλογία κροσσών συμβολής στο συμβολόγραμμα.
- γ) Με την ύπαρξη των ορθών τροχιακών δεδομένων του δορυφόρου.

Όσο μικρότερο το διάνυσμα της βάσης τόσο πιο αδύνατη η ορθή απόδοση των υψομέτρων. Ενώ αν το διάνυσμα βάσης είναι πολύ μεγάλο εντοπίζεται απώλεια συνάφειας, η οποία είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την δημιουργία του συμβολογράμματος. Το συμβολόγραμμα είναι δυνατόν να παραχθεί όταν το μήκος των κροσσών βάσης είναι πάντοτε μεγαλύτερο από το μήκος κάθε άλλης βάσης μεταξύ των ζευγών των απεικονίσεων SAR.

Φασματικό Φιλτράρισμα.

Φιλτράρεται η φασματική μετατόπιση (spectral shift) η οποία οφείλεται στην διαφορετική γωνία λήψης και πρόσπτωσης. Όταν οι γωνίες πρόσπτωσης ταυτίζονται και το διάνυσμα βάσης ισούται με 0 τότε το διάγραμμα κροσσών θα έχει μηδενικές τιμές και θα είναι αδύνατη η συνέχιση της συμβολομετρικής διαδικασίας. Επίσης, φιλτράρεται το κοινό εύρος της συχνότητας κατά πλάγια διεύθυνση και κατά την διεύθυνση του αζιμούθιου. Σκοπός του φασματικού φιλτραρίσματος είναι η αφαίρεση του θορύβου καθώς το τμήμα των απεικονίσεων που δεν είναι κοινό θεωρείται θόρυβος.

Συμπροσαρμογή Ζεύγους Απεικονίσεων.

Αφορά στην συσχέτιση μεταξύ των δύο απεικονίσεων κύριας (master) και δευτερεύουσας (slave). Πραγματοποιείται σε δύο στάδια. Στο πρώτο στάδιο η δευτερεύουσα εικόνα συσχετίζεται γεωμετρικά χονδρικά με την κύρια και στο δεύτερο στάδιο επαναυπολογίζεται η συσχέτιση των απεικονίσεων με την χρήση αλγορίθμων.

Κροσσοί Συμβολής ή Συμβολόγραμμα.

Η μέθοδος της Συμβολομετρίας Ραντάρ πραγματοποιείται με την χρήση ζεύγους εικόνων Ραντάρ και όπως έχει ήδη αναφερθεί, η πρώτη εικόνα χαρακτηρίζεται ως κύρια (master) και η δεύτερη ως δευτερεύουσα (slave). Κάθε εικονοστοιχείο της εικόνας περιέχει πληροφορίες για το εύρος και την φάση κύματος του παλμού του Ραντάρ. Πολλαπλασιάζοντας κάθε σημείο της μιας εικόνας με τον συζυγή μιγαδικό της άλλης παράγεται το συμβολόγραμμα ή διάγραμμα κροσσών συμβολής (Εικόνα 2.4). Η τιμή της φάσης δίνεται από τον τύπο:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} 2R$$

και η διαφορά φάσης δίνεται από τον τύπο:

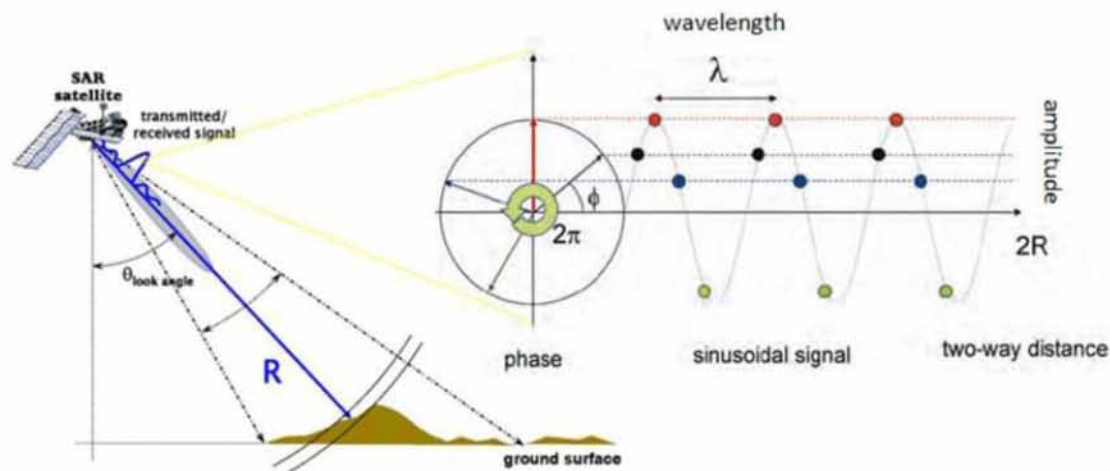
$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} R,$$

όπου: φ : η γωνία που εκφράζει την αλλαγή φάσης του σήματος που ανακλάται και επιστρέφει,

λ : το μήκος κύματος,

R : η κεκλιμένη απόσταση.

Οι κροσσοί συμβολής παίρνουν τιμές στο κλειστό διάστημα 0 έως 2π ($[0, 2\pi]$). Ο κάθε κροσσός αντιπροσωπεύει την μετατόπιση της επιφάνειας της περιοχής μελέτης η οποία είναι ίση με $\lambda/2$ (το μισό μήκος κύματος που επιστρέφει στον δορυφόρο).



Εικόνα 2.4 - Αναπαράσταση διαδικασίας συμβολομετρικής φάσης (Παρχαρίδης, 2014)

Για παράδειγμα, κατά την απεικόνιση ενός λόφου οι κροσσοί συμβολής εμφανίζονται σαν ομόκεντρες ζώνες ακριβώς όπως οι υψομετρικές καμπύλες. Ο συνολικός αριθμός των κροσσών συμβολής μας παρέχει την πληροφορία της συνολικής μετακίνησης της υπό μελέτη περιοχής κατά το χρονικό διάστημα της μελέτης.

Αφαίρεση της Τοπογραφίας.

Πρόκειται για την οριζοντιογραφική διαφορά μεταξύ των σημείων η οποία πρέπει να αφαιρείται μέσω της διαδικασίας flattening ώστε να διευκολύνεται η διαδικασία αποκατάστασης της φάσης.

Φιλτράρισμα του Συμβολογράμματος.

Πρόκειται για την μείωση του θορύβου με σκοπό την βελτίωση της ευκρίνειας των κροσσών και την διατήρηση της φάσεις των δύο απεικονίσεων.

Δημιουργία Εικόνας Συνάφειας.

Αντιπροσωπεύει την ποιότητα της συμβολομετρικής φάσης και εκφράζει τον βαθμό συνάφειας – συσχέτισης του ζεύγους των απεικονίσεων.

Αποκατάσταση της Συμβολομετρικής Φάσης.

Η συμβολομετρική φάση είναι η διαφορά φάσης μεταξύ δύο εικόνων που έχουν ληφθεί από ελαφρώς διαφορετικές θέσεις και περιέχουν την πληροφορία της γεωμετρίας. Είναι δηλαδή, ο χρόνος που απαιτείται από την στιγμή που θα γίνει η εκπομπή του σήματος από τον δορυφόρο προς τον στόχο μέχρι την στιγμή που θα επιστρέψει σε αυτόν. Αφού καθοριστεί η διαφορά φάσης του σήματος επιστροφής σε δύο διαφορετικές κεραίες και σε διαφορετικά περάσματα του δορυφόρου, είναι δυνατόν να προσδιοριστούν οι εδαφικές μετακινήσεις/παραμορφώσεις μιας περιοχής. Στην τιμή της συμβολομετρικής φάσης συντελούν παράγοντες όπως η καμπυλότητα της Γης, η τοπογραφία του εδάφους, οι επιδράσεις της ιονόσφαιρας και της τροπόσφαιρας και οι τυχόν παραμορφώσεις του εδάφους. Στο συμβολόγραμμα η διαφορά φάσης παρέχει την πληροφορία της τοπογραφίας και είναι δυνατόν να παραχθεί Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους.

Η αποκατάσταση της συμβολομετρικής φάσης πραγματοποιείται ώστε να υπολογιστεί ο άγνωστος αριθμός των ακέραιων κύκλων φάσης του σήματος. Στα τμήματα της εικόνας τα οποία έχουν υψηλή συνάφεια, η αποκατάσταση της φάσης γίνεται χωρίς προβλήματα. Η τιμή της συμβολομετρικής φάσης δίνεται από τον τύπο:

$$g(x, y) = z(x, y)z^*(x, y) >, \\ \text{όπου } 0 \leq |g(x, y)| \leq 1$$

Στην περίπτωση που ο συντελεστής συσχέτισης ισούται με 1 έχουμε πλήρη απουσία θορύβου στο σήμα, ενώ όταν ο συντελεστής συσχέτισης ισούται με 0 δεν υπάρχει συνάφεια μεταξύ των σημάτων.

Ακριβής Υπολογισμός της Βάσης.

Μετά την αποκατάσταση της φάσης επαναυπολογίζεται το διάνυσμα βάσης.

Μετατροπή της Φάσης σε Υψόμετρο.

Είναι δυνατή η μετατροπή της φάσης σε υψόμετρο με την χρήση σημείου του εδάφους με γνωστό υψόμετρο.

Γεωκωδικοποίηση.

Κάθε εικονοστοιχείο μετασχηματίζεται από την γεωμετρία της απεικόνισης SAR στην γεωμετρία της ορθής προβολής. Ο μετασχηματισμός πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας το

υψόμετρο ενός εικονοστοιχείου του ελλειψοειδούς σε συνδυασμό με τα στοιχεία τροχιάς του δορυφόρου.

2.3 Τεχνικές και Είδη Συμβολομετρίας Ραντάρ

2.3.1 Τεχνικές Συμβολομετρίας Ραντάρ

Η συμβολομετρία Ραντάρ όπως έχει ήδη αναφερθεί, αφορά την λήψη απεικονίσεων μιας περιοχής σε διαφορετικό χρόνο από ελαφρώς διαφορετική θέση. Διακρίνεται σε:

α) Συμβολομετρία InSAR: Με την τεχνική αυτή εξάγεται την πληροφορία της τοπογραφίας της Γης και παρέχεται η δυνατότητα δημιουργίας υψηλής ποιότητας Ψηφιακού Υψομετρικού Μοντέλου (DEM).

β) Διαφορική Συμβολομετρία DInSAR: Με την μέθοδο αυτή είναι δυνατόν να αναλυθεί η παραμόρφωση στην επιφάνεια της γης, εστιάζοντας στην διαφορά φάσης μεταξύ των εικόνων συνθετικού ανοίγματος (SAR). Οι εικόνες έχουν ληφθεί από διαφορετικές θέσεις και η διαφορά φάσης μας δίνει χρήσιμες πληροφορίες για την γεωμετρία των εικόνων. Παρόλο που η τεχνική της Δορυφορικής Συμβολομετρίας έχει αναπτυχθεί τα τελευταία χρόνια και αποτελεί τον πλέον αξιόπιστο τρόπο εύρεσης και ελέγχου των εδαφικών παραμορφώσεων, περιορίζεται μόνο στις περιπτώσεις όπου υπάρχει πλήρης συμβολομετρική συνάφεια.

Στην περίπτωση των μικρομετακινήσεων και παραμορφώσεων της γήινης επιφάνειας, η διαφορική συμβολομετρία μας δίνει την δυνατότητα να αφαιρέσουμε την τοπογραφία ώστε το τελικό παραγόμενο προϊόν να απομονώνει την φάση και να αποδίδει τυχόν μετακινήσεις και παραμορφώσεις. Η αφαίρεση της τοπογραφίας πραγματοποιείται με τους εξής τρόπους:

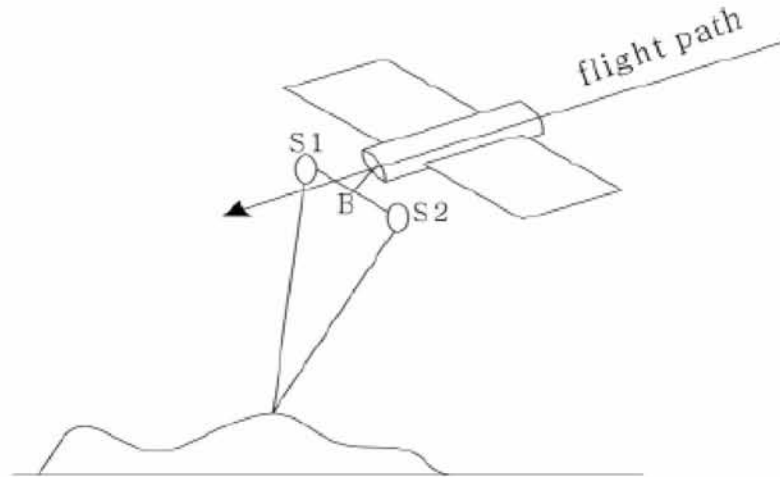
- Μέθοδος μικρής βάσης
- Ζεύγος απεικονίσεων SAR και Ψηφιακό Μοντέλο Εδάφους
- Μέθοδος τριών απεικονίσεων SAR
- Μέθοδος μονίμων σκεδαστών
- Μέθοδος υποσυνόλων μικρών βάσεων

2.3.2 Είδη Συμβολομετρίας Ραντάρ

Ανάλογα με την γεωμετρική διάταξη του διανύσματος της βάσης διακρίνονται οι εξής κατηγορίες συμβολομετρίας:

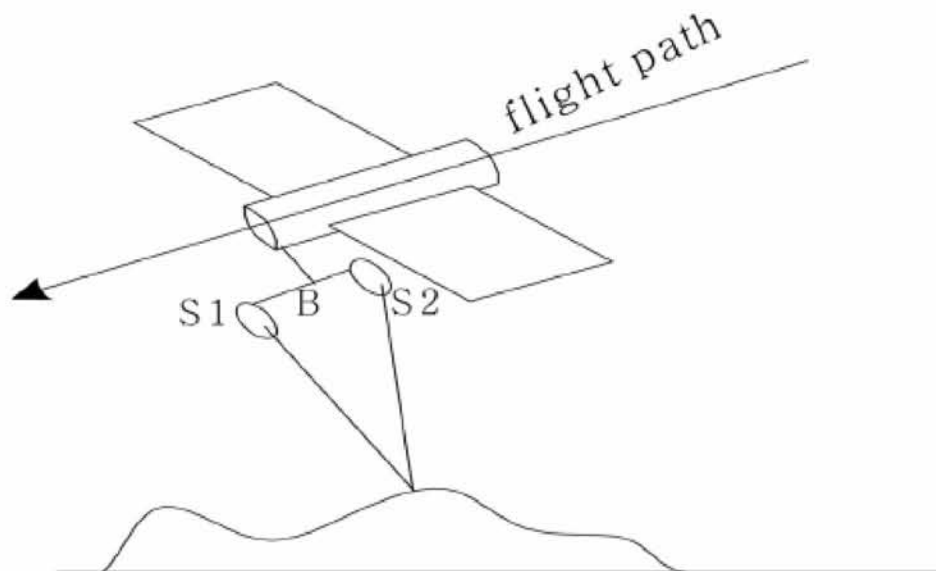
α) Συμβολομετρία στην κάθετη στην τροχιά διεύθυνση (Across-track Interferometry): με την μέθοδο αυτή χρησιμοποιούνται δύο κεραίες σε κάθετη διεύθυνση σε σχέση με την τροχιά πτήσης. Η μία κεραία αποτελεί τον πομπό και η άλλη τον πομπό και τον δέκτη της

ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Το διάνυσμα της βάσης προσδιορίζεται από τις διάφορες θέσεις των κεραιών και είναι κάθετο στην τροχιά πτήσης (Εικόνα 2.5).



Εικόνα 2.5 – Across-track interferometry (Zoo Wei-Bao, 2009)

β) Συμβολομετρία κατά μήκος της τροχιάς (Along-track Interferometry): με την μέθοδο αυτή και οι δύο κεραιές τοποθετούνται κατά μήκος της τροχιάς πτήσης. Το διάνυσμα βάσης προσδιορίζεται από τις διάφορες θέσεις των κεραιών και είναι παράλληλο στην τροχιά πτήσης (Εικόνα 2.6).



Εικόνα 2.6- Along-track interferometry (Zoo Wei-Bao, 2009)

γ) Επαναληπτική συμβολομετρία (Repeat-pass Interferometry): με την μέθοδο αυτή χρησιμοποιείται μία κεραία και πρέπει οπωσδήποτε να είναι γνωστή η ακριβής τροχιά πτήσης. Ο δορυφόρος διέρχεται από την περιοχή λήψης τουλάχιστον δύο φορές σε κοντινές

τροχιές και με διαφορετικές γωνίες λήψης. Το διάνυσμα βάσης προσδιορίζεται από τις δύο διαφορετικές θέσεις λήψης.

ε) Συμβολομετρία πλήρως πολωμένων απεικονίσεων (PolInSAR): Με την μέθοδο αυτή αξιοποιούνται τα συμβολογράμματα που παράγονται από τις διευθύνσεις πόλωσης: HH / HV / VH / VV και ο πίνακας σκέδασης. Ο πίνακας σκέδασης αποδίδει τα γεωφυσικά χαρακτηριστικά των εικόνων συνθετικού ανοίγματος / SAR και καθιστά δυνατή την ταξινόμηση του εδάφους.

στ) Χρονοσειρές: Με την μέθοδο αυτή αξιοποιείται μια σειρά η εικόνων SAR απεικονίσεων που αφορούν την ίδια περιοχή σε διαφορετικές χρονικές περιόδους. Είναι δυνατόν να εντοπιστεί ο ετήσιος ρυθμός εδαφικών παραμορφώσεων για συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Η μέθοδος των χρονοσειρών βρίσκει καλύτερη εφαρμογή με την μέθοδο σταθερών σκεδαστών και την μέθοδο υποσυνόλων μικρών βάσεων.

1) Η μέθοδος των σταθερών σκεδαστών (Persistent Scatterer's - PS) χρησιμοποιεί κάποιους σταθερούς στόχους των οποίων τα χαρακτηριστικά οπισθοσκέδασης παραμένουν αναλλοίωτα (για παράδειγμα τέτοιοι στόχοι είναι κτίρια, γέφυρες κ.α.). Η ακριβής μετατόπιση/παραμόρφωση ορίζεται από το μήκος κύματος του δέκτη και την χρονική διαφορά των εικόνων.

2) Η μέθοδος των υποσυνόλων μικρών βάσεων (Small Baseline Subset - SBAS) παρακολουθεί την χρονική εξέλιξη των μετατοπίσεων/παραμορφώσεων της γήινης επιφάνειας. Στην τεχνική αυτή συνδυάζονται τα διαφορικά συμβολογράμματα με χαρακτηριστικά μικρών γραμμών βάσης και μικρής χρονικής διαφοράς λήψης ώστε το τελικό προϊόν να δημιουργείται μέσω του δικτύου συμβολογραμμάτων και θα αποτελεί χάρτη εδαφικής παραμόρφωσης.

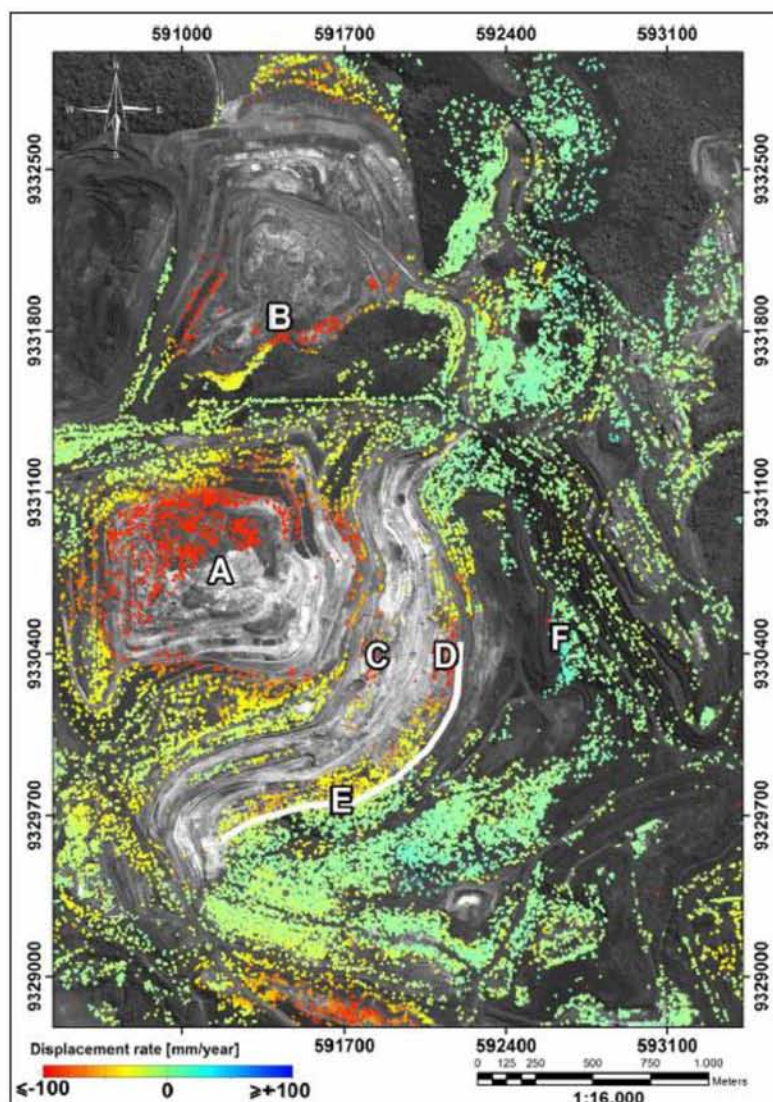
2.4 Εφαρμογές Συμβολομετρίας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η Συμβολομετρική μέθοδος χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό μετατοπίσεων – παραμορφώσεων της γήινης επιφάνειας. Αυτό συμβαίνει καθώς παρέχεται η πληροφορία των αλλαγών στην γήινη επιφάνεια όχι στιγμιαία (όπως γίνεται με τις επίγειες μετρήσεις) αλλά σε τακτά χρονικά διαστήματα με αποτέλεσμα να μπορούν να εξαχθούν σαφή και αξιόπιστα συμπεράσματα για τον ρυθμό παραμόρφωσης και τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά αυτής.

Επίσης η μελέτη παραμόρφωσης της γήινης επιφάνειας λόγω έκρηξης λάβας θεωρείται πλέον αξιόπιστη και πιο ακριβής. Είναι δυνατόν να καταγραφούν οι επιπτώσεις της εκπομπής λάβας σε όλη την έκταση που καταλαμβάνει. Ακόμη και στην περίοδο «ηρεμίας» του ηφαιστείου, η μετακίνηση του μάγματος στο υπέδαφος δημιουργεί τεκτονικές μικρομετακινήσεις η

ανίχνευση των οποίων επιτρέπει να μελετηθούν καλύτερα οι γεωλογικές και γεωφυσικές διεργασίες που προκαλούν την ηφαιστειακή δραστηριότητα (Δεληκάρογλου, 2005).

Η επίδραση των συνεχών εξορύξεων μπορούν να υπολογιστούν με την Συμβολομετρική δημιουργούν μέθοδο. Είναι σαφές ότι οι διεργασίες που πραγματοποιούνται στα ορυχεία, είτε αναφερόμαστε σε εργασίες που λαμβάνουν χώρα στο υπέδαφος είτε αναφερόμαστε σε εργασίες που λαμβάνουν χώρα στην επιφάνεια του εδάφους δημιουργούν καθιζήσεις με αποτέλεσμα μερική ή ολική (σε ακραίες περιπτώσεις) κατάρρευση του εδάφους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η περίπτωση του ορυχείου εξόρυξης σιδήρου στην επαρχία Carajas στην Βραζιλία όπου βρίσκεται το δεύτερο μεγαλύτερο απόθεμα σιδήρου στον κόσμο. Παρόλο που η εξόρυξη πραγματοποιείται μέσω ανοιχτών ρείθρων, παρατηρήθηκαν στην ευρύτερη περιοχή υψηλά ποσοστά μετατοπίσεων που αγγίζουν τα -47,72 εκατοστά με ρυθμό παραμόρφωσης -126,55 εκατοστά/έτος (Εικόνα 2.7).



Εικόνα 2.7 - Ψηφιακό μοντέλο εδάφους που δείχνει τον ρυθμό μετατοπίσεων στην επαρχία Carajas, Brazil (Waldir R. Paradella et al., 2015)

Η συνεχιζόμενη ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου έχει οδηγήσει στην αύξηση της μέσης θερμοκρασίας του πλανήτη και μία από τις σοβαρότερες επιπτώσεις είναι το λιώσιμο των πάγων στην Ανταρκτική. Η συμβολομετρική διαδικασία μπορεί να εντοπίσει τα προβλήματα που δημιουργούνται εξαιτίας του φαινομένου και συλλέγονται πληροφορίες που αφορούν την ταχύτητα ροής των υδάτων και την κατάσταση των παγετώνων και, συναρτήσει των καιρικών συνθηκών είναι δυνατόν να υπολογιστεί η ταχύτητα ανόδου της θάλασσας.

2.5 Παράγοντες που Επηρεάζουν την Συμβολομετρία

Η συμβολομετρική μέθοδος είναι δυνατόν να οδηγήσει σε εσφαλμένα αποτελέσματα όταν συντρέχουν συγκεκριμένοι παράγοντες που μπορούν να επηρεάσουν την διαδικασία.

Τροχιά

Είναι απαραίτητη η γνώση των τροχιακών δεδομένων του δορυφόρου κάθε χρονική στιγμή καθώς εξάγεται η τιμή του διανύσματος βάσης και άρα η γεωμετρία της βάσης. Η ανακρίβεια προσδιορισμού της τροχιάς οδηγεί σε σφάλματα ικανά να εμποδίσουν την πρόοδο της συμβολομετρικής διαδικασίας.

Ατμόσφαιρα

Τα συστατικά στοιχεία των σύννεφων, η θερμοκρασία, η πίεση και η υγρασία της τροπόσφαιρας και της ιονόσφαιρας μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την συμβολομετρική μέθοδο. Όσο αυξάνεται η τιμή των στοιχείων αυτών τόσο μεγαλύτερη η χρονική καθυστέρηση της φάσης. Απαιτείται ατμοσφαιρική διόρθωση των απεικονίσεων με στόχο την μείωση της χρονικής διάρκειας της φάσης. Επίσης η μέθοδος staking εκτός από την μείωση της επίδρασης της ατμόσφαιρας συμμετέχει στην ομαλοποίηση των συμβολογραμμάτων.

Επεξεργασία των απεικονίσεων

Η επεξεργασία των απεικονίσεων είναι απαραίτητη για την συνέχιση της συμβολομετρικής διαδικασίας. Μεγάλη προσοχή πρέπει να δίνεται κατά την διαδικασία της αποκατάστασης της φάσης, το φιλτράρισμα λόγω κηλίδωσης, την συμπροσαρμογή των εικόνων και κατά την διαδικασία αφαίρεσης του όρου της τοπογραφίας.

Διάνυσμα βάσης (Χωρική αποσυσχέτιση)

Το διάνυσμα βάσης υποδεικνύει την απόσταση μεταξύ των διαφορετικών λήψεων. Όσο μεγαλύτερο είναι το διάνυσμα βάσης τόσο μεγαλύτερη η αποσυσχέτιση – ασάφεια των δύο εικόνων. Το μήκος του διανύσματος βάσης θα πρέπει να είναι μικρότερο από την κρίσιμη βάση ώστε να μην εμποδίζει την διαδικασία της συμβολομετρικής μεθόδου.

Συμπροσαρμογή εικόνων

Κατά την συμπροσαρμογή των εικόνων ουσιαστικά αντιστοιχίζονται τα εικονοστοιχεία της κύριας απεικόνισης με τα εικονοστοιχεία της δευτερεύουσας. Στην περίπτωση που η συμπροσαρμογή αποτύχει λόγω λανθασμένης αντιστοιχίας έχει ως αποτέλεσμα πολύ χαμηλή συνάφεια μεταξύ των απεικονίσεων και άρα παρεμπόδιση της συμβολομετρικής μεθόδου.

Χρονική αποσυσχέτιση

Η χρονική αποσυσχέτιση αφορά κυρίως το φαινόμενο της σκέδασης. Άρα είναι πολύ σημαντική η περιοχή μελέτης καθώς σε περιοχές με χαμηλή υγρασία δεν υπάρχει χρονική αποσυσχέτιση ενώ σε δασικές περιοχές που έχουν υψηλό ποσοστό υγρασίας η χρονική αποσυσχέτιση μεγαλώνει ακόμη και αν οι εικόνες έχουν μικρή μεταξύ τους απόσταση. Αντίθετα σε περιοχές με πάγους η χρονική αποσυσχέτιση είναι μικρή αλλά αυξάνεται χρονικά καθώς λιώνουν οι πάγοι.

3 Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος / SAR

Τα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος / SAR αποτελούν πρόγραμμα συνεργασίας μεταξύ της Εθνικής Υπηρεσίας Αεροναυπηγικής και Διαστήματος (ΝΑΣΑ / NASA), της Γερμανικής Διαστημικής Υπηρεσίας (DARA) και της Ιταλικής Διαστημικής Υπηρεσίας (ASI). Κύριος στόχος της αποστολής ήταν η χρήση των καναλιών L, C και X με σκοπό την σάρωση της Γης ανεξαρτήτως χρόνου και καιρικών συνθηκών. Αποτελούν ενεργά συστήματα τηλεπισκόπησης λειτουργώντας και ως πομποί και ως δέκτες και εφαρμόζεται η τεχνική σύνθεσης της μέτρησης μια κεραίας μεγάλου μήκους σε συνδυασμό με τα σήματα που παραλαμβάνονται κατά μήκος μιας πτήσης. Τα χαρακτηριστικά των συστημάτων SAR είναι τα εξής:

- α) Εκπομπή σημάτων προς την επιφάνεια της γης.
- β) Το σήμα ανακλάται στην επιφάνεια της γης και επιστρέφει στην κεραία.
- γ) Είναι δυνατόν να υπολογιστεί η απόσταση του στόχου από την κεραία και ο χρόνος διάδοσης του σήματος από και προς την κεραία.

Το παραγόμενο προϊόν είναι δεδομένα επιφανειακών παραμορφώσεων και μετατόπισης με πολύ υψηλή χωρική ανάλυση. Το σύστημα του Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος παρέχει δύο ειδών πληροφορίες:

- α) Κωδικοποιείται η ισχύς του ανακλώμενου σήματος και παρέχεται η πληροφορία της κλίσης της επιφάνειας, το μέγεθος των αντικειμένων και η υγρασία του εδάφους.
- β) Αποκωδικοποιείται το σήμα επιστροφής του Ραντάρ και παρέχεται η πληροφορία της απόστασης του στόχου από τον δορυφόρο κάθε χρονική στιγμή.

3.1 Απεικονίσεις Συνθετικού Ανοίγματος

Τα Ραντάρ Συνθετικού Ανοίγματος χρησιμοποιούν μονοχρωματική ακτινοβολία συγκεκριμένου μήκους κύματος, το οποίο καθορίζει το βάθος διείσδυσης στην μάζα του εκάστοτε στόχου και τα χαρακτηριστικά σκέδασης της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας (Μερτίκας, 1999). Η λήψη των απεικονίσεων πραγματοποιείται ανάλογα με την τροχιά του δορυφόρου. Η τροχιά από Βορρά προς Νότο ονομάζεται καθοδική (descending orbit) και η τροχιά από Νότο προς Βορρά ονομάζεται ανοδική (ascending orbit).

Οι εικόνες Ραντάρ είναι ουσιαστικά χάρτες και κάθε εικονοστοιχείο αντιπροσωπεύει την οπισθοσκεδαζόμενη ακτινοβολία. Εξαιτίας της γεωμετρίας του στόχου (κυρίως λόγω του ανάγλυφου της περιοχής μελέτης), οι απεικονίσεις SAR παρουσιάζουν τις εξής γεωμετρικές παραμορφώσεις:

α) Αναστροφή (layover): Όταν δημιουργείται το φαινόμενο της αναστροφής ο στόχος εμφανίζεται ανεστραμμένος. Αυτό συμβαίνει καθώς η ακτινοβολία που ανακλάται από το υψηλότερο σημείο του στόχου επιστρέφει στο σύστημα Ραντάρ νωρίτερα από την ακτινοβολία που ανακλάται από το χαμηλότερο σημείο.

β) Σμίκρυνση (foreshortening): Προκαλείται συμπίεση της εικόνας σε διεύθυνση εγκάρσια προς την διεύθυνση της τροχιάς του δορυφόρου. Σαν αποτέλεσμα έχουμε την απεικόνιση των ίσων επιφανειών σαν άνισες. Όταν η δέσμη της ακτινοβολίας μεταδίδεται κάθετα σε μία πλαγιά (η γωνία παρατήρησης ισούται με 0) τότε το φαινόμενο της σμίκρυνσης γίνεται ακόμη εντονότερο. Αντίθετα όσο μεγαλύτερη η γωνία πρόσπτωσης τόσο μικρότερο το φαινόμενο της σμίκρυνσης.

γ) Σκίαση (shadow): Συνήθως δημιουργείται σε περιοχές με έντονο ανάγλυφο, όπως μία πλαγιά, όπου δεν είναι δυνατόν να φωτιστούν όλες οι πλευρές της. Το φαινόμενο της σκίασης είναι εντονότερο όσο μεγαλώνει η γωνία θέασης. Παρά ταύτα, η σκίαση είναι χρήσιμη για τις περιπτώσεις καθορισμού του ύψους ενός αντικειμένου.

δ) Πτύχωση (layover): Συμβαίνει όταν η κλίση του εδάφους είναι μεγαλύτερη από την γωνία όρασης του ραντάρ με αποτέλεσμα το υψηλότερο σημείο του εδάφους να επιστρέφει το σήμα ραντάρ γρηγορότερα σε σχέση με το χαμηλότερο σημείο με αποτέλεσμα αν εμφανίζεται παραμορφωμένο το έδαφος.

Κύριο χαρακτηριστικό των απεικονίσεων SAR είναι κηλίδωση (speckle). Ουσιαστικά πρόκειται για έντονη παρουσία θορύβου. Αφορά γειτονικά εικονοστοιχεία/pixels τα οποία παρουσιάζουν έντονες μεταβολές στις διαβαθμίσεις του γκρι. Με την χρήση ειδικών φίλτρων είναι δυνατόν να μειωθεί ο θόρυβος χωρίς βέβαια να μπορεί να εξαλειφτεί πλήρως. Μειώνεται όμως η ποιότητα της απεικόνισης και μπορεί να διορθωθεί με τους εξής τρόπους:

1. Επεξεργασία πολλών όψεων (multi-look): Η δέσμη της ακτινοβολίας χωρίζεται σε περισσότερες ζώνες με μικρότερο εύρος και δημιουργούνται ανεξάρτητες απεικονίσεις.

Ανάλογα με τον αριθμό των απεικονίσεων στο παραγόμενο προϊόν παράγεται αντίστοιχες φορές μειωμένη διαχωριστική ικανότητα (Κασκαρά, 2015).

2. Χρήση φίλτρων εξομάλυνσης: Με την χρήση φίλτρων επιτυγχάνεται η μείωση του φαινομένου της κηλίδωσης με ταυτόχρονη μείωση της χωρικής ανάλυσης της απεικόνισης.

3.2 Παράγοντες που Επηρεάζουν τις απεικονίσεις SAR

Υπάρχει μία σειρά παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα των απεικονίσεων SAR και τα οποία μπορούν να προκαλέσουν αλλοίωση των αποτελεσμάτων:

- α) Τα χαρακτηριστικά του δορυφορικού συστήματος όπως η γωνία πρόσπτωσης της δέσμης ακτινοβολίας, ο θόρυβος του συστήματος Ραντάρ και η χωρική ανάλυση του συστήματος.
- β) Τα χαρακτηριστικά της τροχιάς όπως η ακρίβεια της τροχιάς, το διάνυσμα βάσης που συνδέεται άμεσα με την συνάφεια των εικόνων και την γεωμετρική αποσυσχέτιση και η απουσία παραλληλίας στις τροχιές του δορυφόρου.
- γ) Η συχνότητα και η πόλωση του σήματος καθώς και ο θόρυβος του συστήματος (speckle).
- δ) Η τοπογραφία του εδάφους και ιδιαίτερα η έντονη παρουσία ορεινών όγκων και ο προσανατολισμός τους, τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του εδάφους όπως βλάστηση, παρουσία πάγου, παρουσία νερού και παρουσία δόμησης.
- ε) Σε περιπτώσεις έντονης νεφοκάλυψης υπάρχει κίνδυνος αλλοίωσης της ποιότητας των απεικονίσεων.

4 Περιοχή Μελέτης

4.1 Τεκτονική του Ελλαδικού χώρου.

Ο Ελληνικός χώρος παρουσιάζει έντονα σεισμικά φαινόμενα και οι σεισμοί που πραγματοποιούνται είναι επιφανειακοί με εστιακό βάθος 190 χιλιόμετρα. Βασικά χαρακτηριστικά της Ελληνικής τεκτονικής είναι:

- α) Η Ελληνική τάφρος οποία είναι παράλληλη προς το ελληνικό τόξο και έχει παρόμοια χαρακτηριστικά με της ωκεάνιες τάφρους που βρίσκονται κοντά στην σύγκλιση των λιθοσφαιρικών πλακών. Αποτελείται από μια ακολουθία από θαλάσσιες λεκάνες που βρίσκονται σε βάθος από 2000 μέτρα έως 5000 μέτρα και εκτείνεται από την Κεφαλονιά έως την Ρόδο.
- β) Το τόξο εκτείνεται στα νησιά Ρόδο, Κάρπαθο, Κρήτη και Κύθηρα και έχει δημιουργηθεί λόγω της σύγκλισης της Ευρασιατικής πλάκας με την Αφρικανική πλάκα «με αποτέλεσμα την υποβοήθηση της εναπομένουσας ωκεάνιας πλάκας κάτω από την μικροπλάκα Αιγαίου – Ανατολίας» (Παπαζάχος κ.α., 2003). Η Ευρασιατική πλάκα περιλαμβάνει την Ευρώπη και

την Ρωσία και ορίζεται προς τα νότια από την Μεσόγειο και τα Ιμαλάια με νοτιοανατολική φορά κίνησης. Η Αφρικανική πλάκα κινείται βορειοανατολικά απέναντι από την νότια Ευρώπη. Η σύγκρουση των δύο πλακών οδήγησε στην δημιουργία των Άλπεων (Εικόνα 4.1).



Εικόνα 4.1- Η καταβύθιση της Αφρικανικής πλάκας κάτω από την Ευρασιατική (<http://www.oasp.gr>)

γ) Το ηφαιστειακό τόξο βρίσκεται στο εσωτερικό τμήμα του τόξου και δημιουργείται από την άνοδο μάγματος στην επιφάνεια. Είναι παράλληλο προς το ιζηματογενές τόξο και αποτελείται από τα ηφαίστεια Μέθανα, Σαντορίνη, Κως και Νίσυρος.

δ) Το εξωτερικό ιζηματογενές τόξο εκτείνεται στην νότια οροσειρά των Ελληνίδων, τα Ιόνια νησιά, την Κάρπαθο, τη Ρόδο και την Κρήτη και συνδέει τις Διναρικές Άλπεις με τις Τουρκικές Ταυρίδες.

Οι αλλαγές που μπορεί να επιφέρει μια σεισμική δόνηση διακρίνονται σε:

α) Διαρρήξεις: Πρόκειται για την δημιουργία ρωγμών σχετικά μεγάλων διαστάσεων οι οποίες ονομάζονται χάσματα. Τα χάσματα εντοπίζονται στην επιφάνεια της γης και το μέγεθος τους εξαρτάται από το μέγεθος της σεισμικής δόνησης και από την απόσταση από το επίκεντρο της.

β) Κατολισθήσεις: Συνήθως εντοπίζονται σε επιφάνειες με μεγάλη κλίση και σε επιφάνειες με όχι και τόσο συμπαγές έδαφος (Εικόνα 4.2). Όσο πιο κοντά στο επίκεντρο του σεισμού βρίσκεται μια τέτοια επιφάνεια τόσο εντονότερο το φαινόμενο της κατολίσθησης.



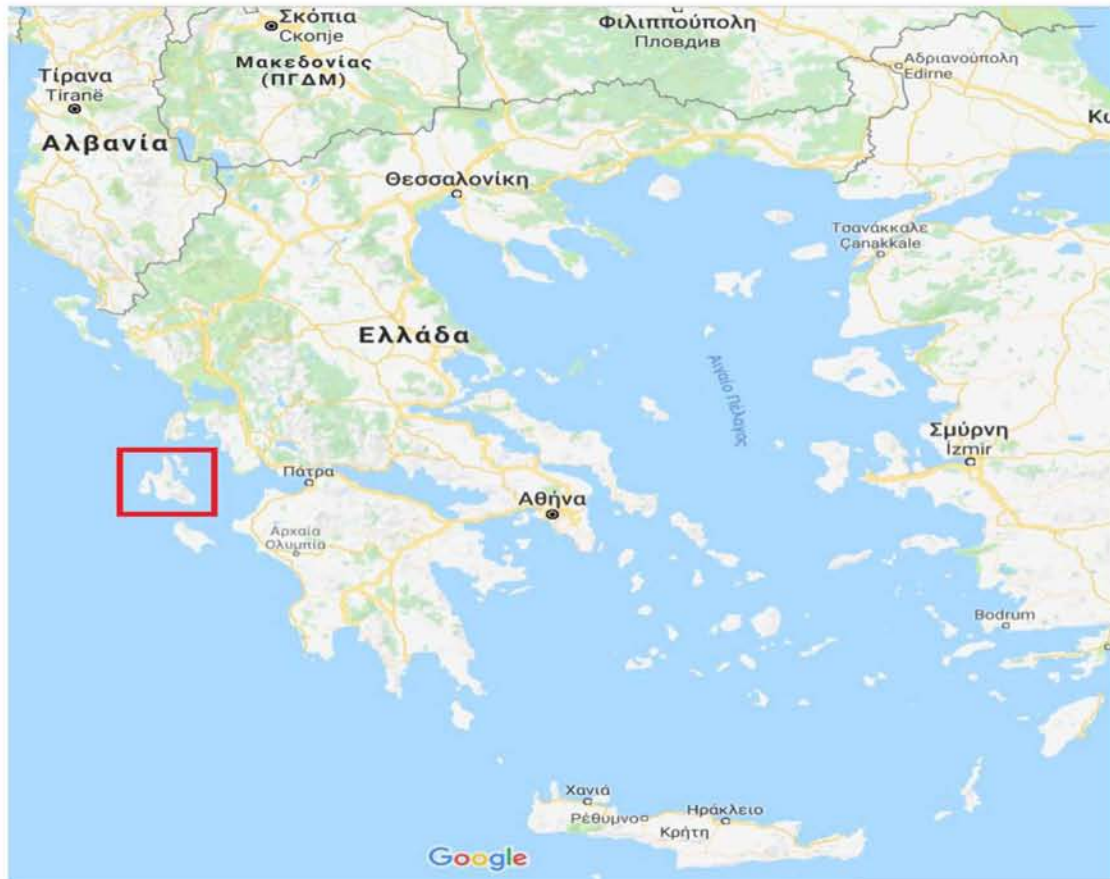
Εικόνα 4.2- Κατολίσθηση πλαγιάς λόγω σεισμού (www.google.gr)

γ) Βαθύνσεις: Πρόκειται για το φαινόμενο κατά το οποίο η μείωση της τριβής μεταξύ των στοιχείων του υλικού το καθιστά ρευστό με αποτέλεσμα να δημιουργούνται τρύπες στο έδαφος, το βάθος των οποίων μπορεί να φτάσει αρκετά μέτρα κάτω από τη γη.

δ) Υψομετρικές μεταβολές: Πρόκειται για έξαρση ή καθίζηση του εδάφους σαν αποτέλεσμα ενός μεγάλου σεισμού. Συνήθως η υψομετρική μεταβολή εντοπίζεται από την μεταβολή στην στάθμη του νερού των λιμνών.

4.2 Περιοχή Μελέτης

Η Κεφαλονιά βρίσκεται στο σύμπλεγμα των Επτανήσων στο Ιόνιο Πέλαγος (Εικόνα 4.3). Είναι το μεγαλύτερο από τα επτά νησιά (Κέρκυρα, Παξοί, Λευκάδα, Ζάκυνθος, Ιθάκη, Κύθηρα), το τρίτο σε σειρά πληθυσμιακά, καταλαμβάνει έκταση 779,30 τετραγωνικά χιλιόμετρα και το μεγαλύτερο μέρος της επιφάνειας του νησιού καλύπτεται από ορεινό όγκο με την οροσειρά του Αίνου να δεσπόζει στο κέντρο του νησιού. Χαρακτηριστικό του νησιού αποτελεί το γεγονός ότι υπάρχουν 365 οικισμοί (εκτείνονται κατά μήκος της παράκτιας ζώνης) οι οποίοι και κατοικούνται και ο μόνιμος πληθυσμός φτάνει τους 37767 κατοίκους.



Εικόνα 4.3- Χάρτης της Ελλάδας (www.google.gr/maps)

Η Κεφαλονιά έχει πλούσια ιστορία ισχυρών σεισμών καθώς βρίσκεται στην ζώνη υψηλής σεισμικότητας του Ιονίου Πελάγους. Η σύγκρουση της Ευρασιατικής πλάκας με την Αφρικανική και η μετατόπιση του μετώπου Απουλίας – Αιγαίου ανατολικότερα οδηγεί στην σταδιακή μετατόπιση του νησιού. Η μετατόπιση του μετώπου οφείλεται στην ρηξιγενή ζώνη μετασχηματισμού της Κεφαλονιάς – Λευκάδας η οποία εκτείνεται υποθαλάσσια βόρεια της Λευκάδας, παράλληλα με τις ακτές της Ηπείρου και φτάνει έως τις Αλβανικές ακτές. Για την ακρίβεια η ενεργός τεκτονική που εκτείνεται από τον θαλάσσιο χώρο της δυτικής Λευκάδας έως την δυτική Κεφαλονιά κυριαρχείται από οριζόντια ολίσθηση μήκους 80 χιλιομέτρων

Η χωρική διασύνδεση των ακολουθιών του 2003 και 2014 και η ομοιότητα των μηχανισμών γένεσης οδηγούν στο συμπέρασμα ότι από το θαλάσσιο χώρο της δυτικής Λευκάδας μέχρι τη δυτική Κεφαλονιά η ενεργός τεκτονική κυριαρχείται από δεξιόστροφη οριζόντια ολίσθηση μήκους περίπου 80 km.

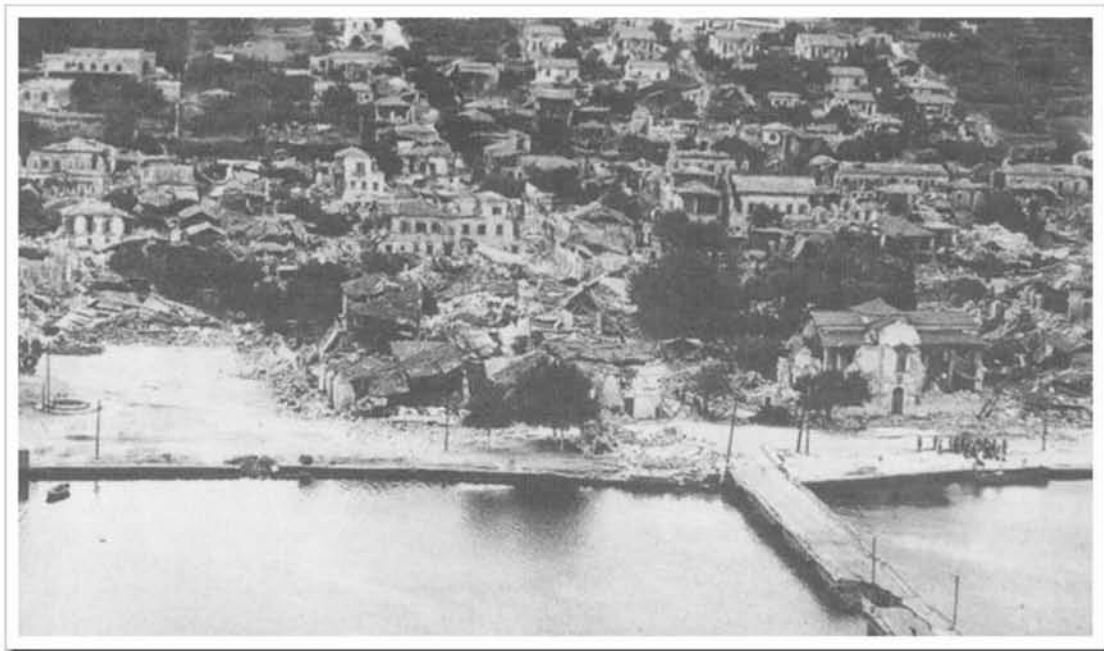
4.3 Το χρονικό των σεισμικών δονήσεων στην περιοχή

Όπως ήδη αναφέρθηκε, η σύγκρουση των δύο πλακών προκαλεί πραγματοποίηση των σεισμικών δονήσεων. Κατά το παρελθόν έχουν πραγματοποιηθεί σεισμοί έντασης έως και 7,4 βαθμούς της κλίμακας Ρίχτερ. Οι πιο χαρακτηριστικές σεισμικές δονήσεις είναι οι εξής:

α) Ο σεισμός της 11^{ης} Ιουλίου 1767 με ένταση 7,2 βαθμούς Ρίχτερ ήταν υπεύθυνος για τον θάνατο 253 ανθρώπων και για καταρρεύσεις αρκετών σπιτιών.

β) Ο σεισμός της 4^{ης} Φεβρουαρίου 1867 με ένταση 7,4 βαθμούς Ρίχτερ διήρκησε 25 έως 30 δευτερόλεπτα και προκάλεσε εκτεταμένες καταστροφές και ειδικά στους οικισμούς που βρίσκονταν κοντά στο επίκεντρο η καταστροφή ήταν ολοκληρωτική.

γ) Ο σεισμός της 12^{ης} Αυγούστου 1953 με ένταση 7,2 βαθμών Ρίχτερ είναι αποτέλεσμα μιας τριήμερης ακολουθίας σεισμικών δονήσεων (9 Αυγούστου 1953, 11 Αυγούστου 1953 και 12 Αυγούστου 1953), η ένταση των οποίων κυμάνθηκε από 6,3 έως 6,8 βαθμούς Ρίχτερ. Αποτέλεσμα των συνεχών δονήσεων ήταν ο θάνατος πολλών κατοίκων κυρίως στο νότιο τμήμα του νησιού και εκτεταμένες καταστροφές που δεν περιορίστηκαν μόνο στο νησί (Εικόνα 4.4) αλλά, περιοχές όπως η Αιτωλία, η Ηλεία, η Ζάκυνθος (Εικόνα 4.5) και η Λευκάδα υπέστηκαν μικρότερης κλίμακας καταστροφές.

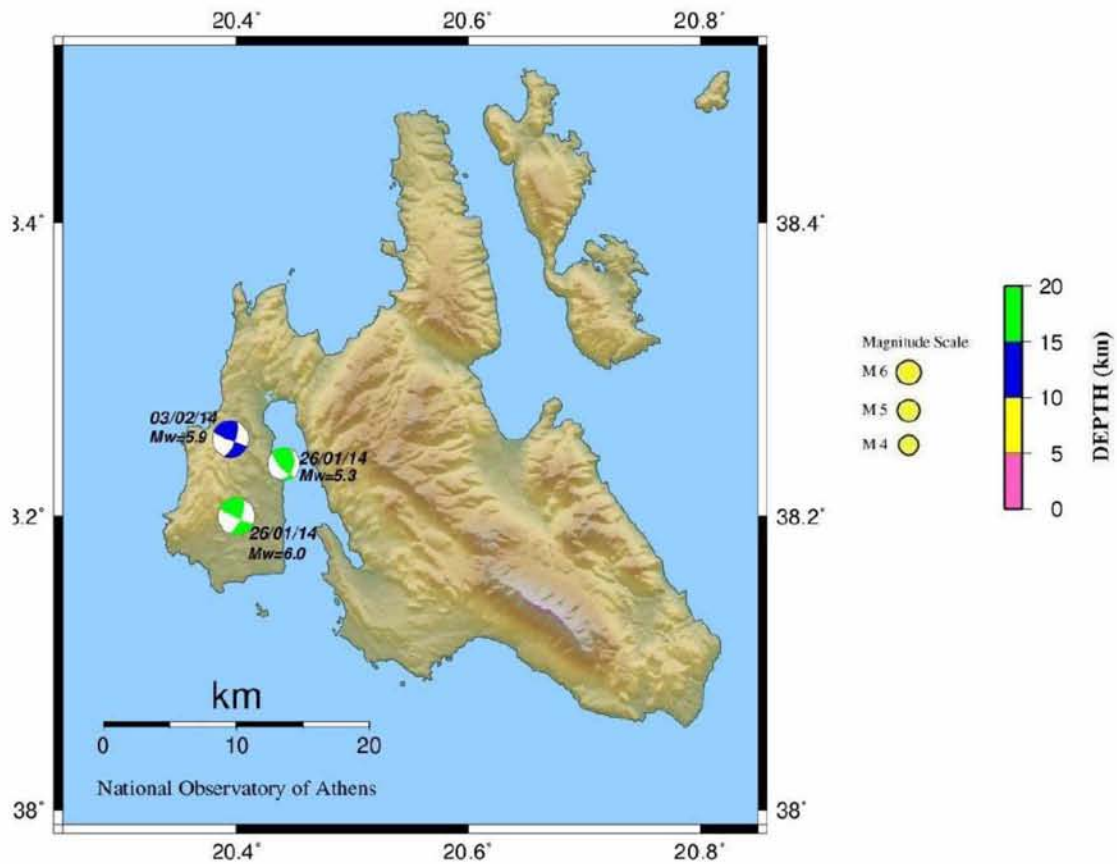


Εικόνα 4.4 - Το Αργοστόλι μετά τον σεισμό της 12ης Αυγούστου 1953 (www.kefaloniitikanea.gr)



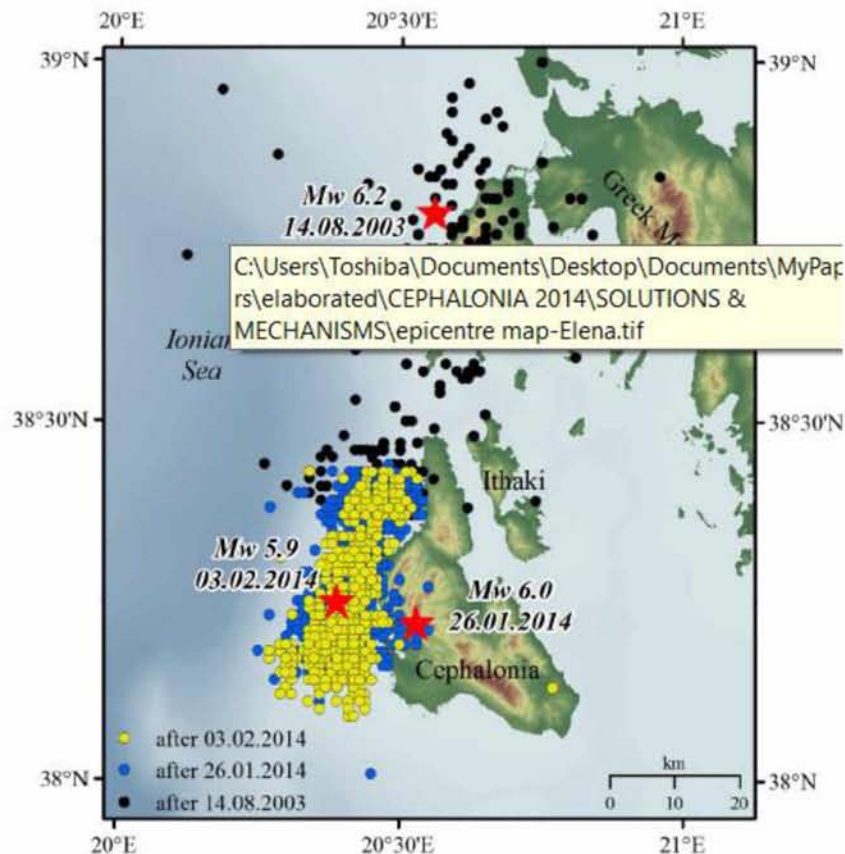
Εικόνα 4.5 - Η Ζάκυνθος μετά τον σεισμό της 12ης Αυγούστου 1953 (www.eirinika.gr)

Η πιο πρόσφατη ακολουθία σεισμικών δονήσεων πραγματοποιήθηκε στις 26 Ιανουαρίου 2014 και στις 3 Φεβρουαρίου 2014 με ένταση 6,0 και 5,1 βαθμούς Ρίχτερ την πρώτη ημέρα και 5,9 βαθμούς Ρίχτερ την επομένη. Τα επίκεντρα των σεισμικών δονήσεων εντοπίζονται στην χερσόνησο της Παλλικής 35 χιλιόμετρα ανατολικά από την πρωτεύουσα του νησιού το Αργοστόλι (Εικόνα 4.6).



Εικόνα 4.6- Χάρτης κύριων σεισμικών δονήσεων (Παπαδόπουλος κ.α.)

Υπήρξε ακολουθία πληθώρας σεισμικών δονήσεων μικρότερης έντασης, οι οποίοι πιστεύεται ότι ήταν οι μετασεισμοί. Στην Εικόνα 4.11 φαίνεται το μέγεθος του φαινομένου καθώς οι μετασεισμοί εκτείνονται σε ολόκληρη η περιοχή και σε αριθμό αγγίζουν χιλιάδες μικροδονήσεις.



Εικόνα 4.7- Χάρτης επικέντρων σεισμικών δονήσεων (Παπαδόπουλος κ.α.)

Οι δονήσεις προκάλεσαν σοβαρές ζημιές δημιουργώντας μεγάλου μήκους ρήγμα στο λιμάνι του Ληξουρίου (Εικόνα 4.8), κατολισθήσεις στην απόκρημνη παραλία του Μύρτου (Εικόνα 4.9) και καταστροφές στο οδικό δίκτυο του νησιού με κυριότερη την κατάρρευση τμήματος της επαρχιακής οδού στην περιοχή «Χάρακας» που συνδέει το βόρειο τμήμα του νησιού με το υπόλοιπο νησί.

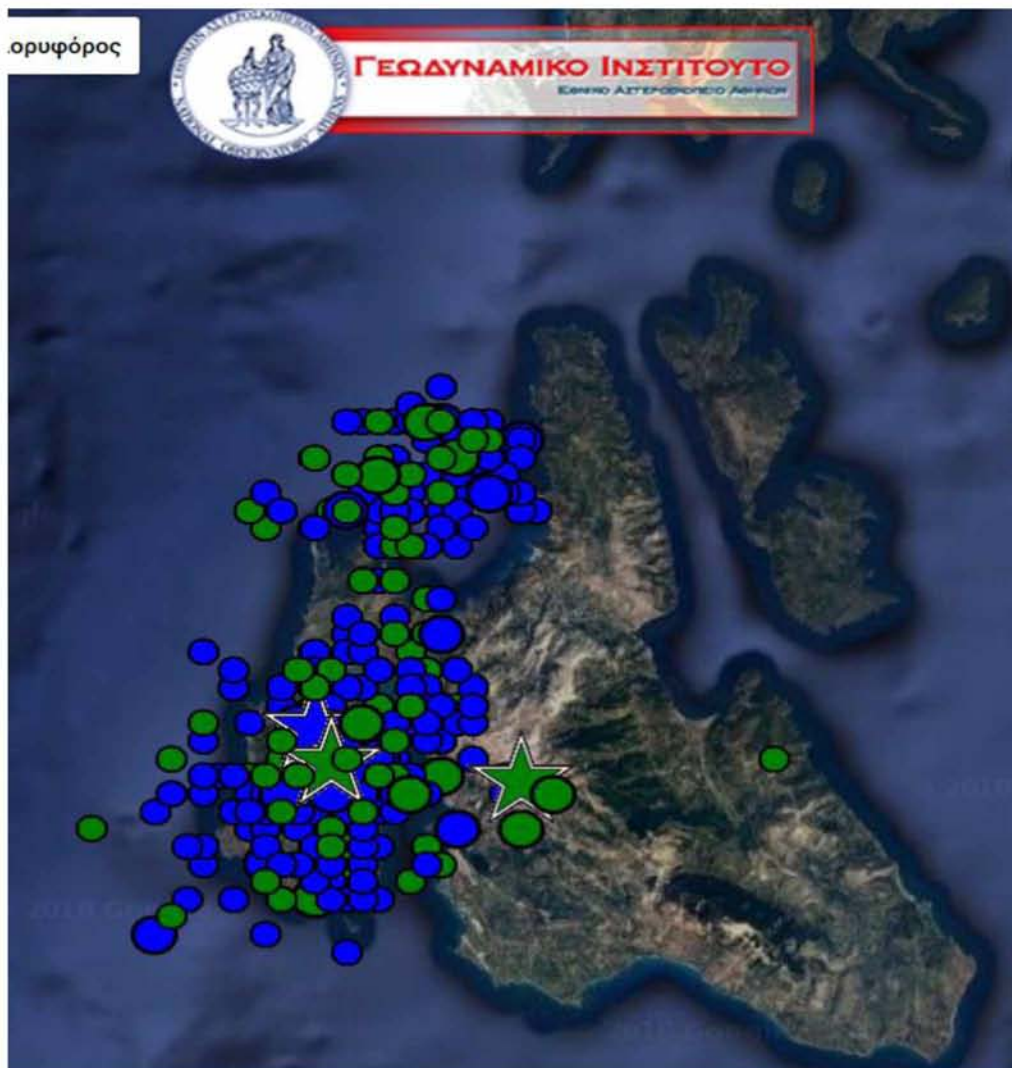


Εικόνα 4.8 - Ρήγμα στο λιμάνι του Ληξουρίου (www.naftemporiki.gr)



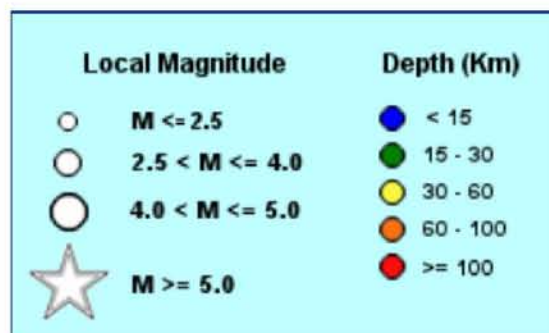
Εικόνα 4.9- Η διάσημη παραλία του Μύρτου μετά την κατολίσθηση (www.zougla.gr)

Οι σεισμικές δονήσεις ήταν τόσο ισχυρές αρκεί να αναλογιστούμε ότι ο σταθμός μέτρησης GPS στην περιοχή Κηπουρίων μετατοπίστηκε 7,4 εκατοστά βορειότερα και ο κεντρικός σταθμός των Βαλσαμάτων μετατοπίστηκε 3 εκατοστά νοτιοδυτικά (George Papathanassiou et al., 2016). Χαρακτηριστική είναι η Εικόνα 4.10 όπου αποτυπώνονται τα επίκεντρα των σεισμικών δονήσεων την υπό μελέτη περίοδο.



Εικόνα 4.10 - Χάρτης σεισμικών δονήσεων κατά την υπό μελέτη περίοδο (www.gein.noa.gr)

Οι κύκλοι χρώματος μπλε αφορούν σεισμικές δονήσεις με εστιακό βάθος μικρότερο των 15 χιλιομέτρων και οι κύκλοι πράσινου χρώματος αφορούν σεισμικές δονήσεις με εστιακό βάθος μεταξύ 15-30 χιλιομέτρων και το μέγεθος των κύκλων και το μέγεθος των άστρων υποδηλώνουν αντίστοιχα το μέγεθος της σεισμικής δόνησης όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.11.



Εικόνα 4.11- Επεξηγηματικός πίνακας στοιχείων σεισμικών δονήσεων (www.gein.noa.gr)

5 Μεθοδολογία

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η παρούσα εργασία ασχολείται με τις εδαφικές παραμορφώσεις στο νησί της Κεφαλονιάς εξαιτίας της σεισμικής δραστηριότητας. Εξαιτίας του έντονου ανάγλυφου του νησιού και της δυσκολίας επεξεργασίας του μεγάλου όγκου δεδομένων για το σύνολο του νησιού, η μελέτη περιορίστηκε στην Χερσόνησο της Παλλικής. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογής Συμβολομετρίας σε όλη την έκταση εκμεταλλεύεται σχεδόν το 100% της μνήμης του υπολογιστή προκαλώντας προβλήματα και καθυστερήσεις στην διαδικασία.

Παρά το γεγονός ότι κάθε εικόνα SLC καταλαμβάνει χώρο στο δίσκο της τάξης των 4 GB, η επιλογή των συγκεκριμένων εικόνων θεωρείται απαραίτητη καθώς εμπεριέχεται η πληροφορία της φάσης η οποία μας επιτρέπει να εντοπίσουμε τις εδαφικές μετατοπίσεις.

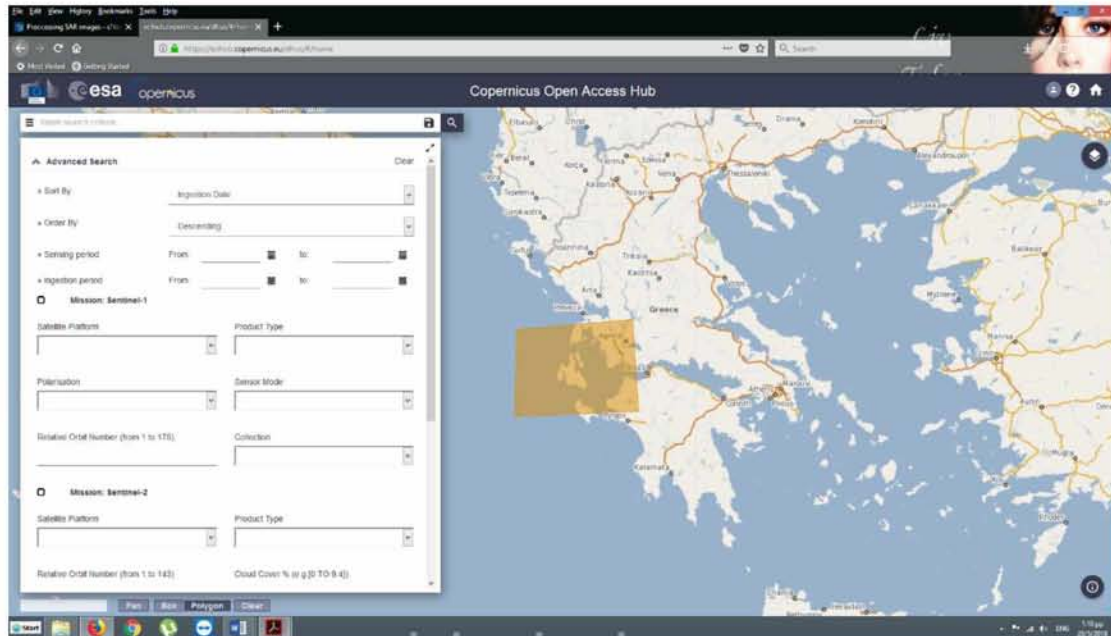
Η συμβολομετρική μέθοδος που επιλέχθηκε είναι η μέθοδος του υποσυνόλου μικρών βάσεων. Στην μέθοδο αυτή συνδυάζονται τα συμβολογράμματα που παράχθηκαν από τα επιλεγμένα ζεύγη εικόνων SLC. Το τελικό προϊόν είναι ένα δίκτυο συμβολογραμμάτων και η προβολή των παραμορφώσεων επάνω σε υπόβαθρο.

5.1 Συλλογή δεδομένων

Στόχος της εργασίας είναι η διαχρονική μελέτη μετατοπίσεων. Αρχικά επιλέχθηκε το χρονικό διάστημα από τον Απρίλιο του 2014 έως τον Απρίλιο του 2015, αμέσως μετά τους δύο ισχυρούς σεισμούς του Ιανουαρίου 2014 και Φεβρουαρίου 2014. Η εφαρμογή της μελέτης για το συγκεκριμένο διάστημα δεν ήταν εφικτή καθώς ο δορυφόρος SENTINEL 1A εκτοξεύθηκε στις 3 Απριλίου 2014 και ο δορυφόρος SENTINEL 1B εκτοξεύθηκε στις 26 Απριλίου 2016. Επίσης η γεωγραφική θέση του νησιού όπως και η ιδιαίτερη γεωμετρία του περιόρισαν ακόμη περισσότερο την αναζήτηση των κατάλληλων εικόνων. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι περισσότερες απεικονίσεις έτεμναν στην μέση την περιοχή μελέτης.

Π.Θ. Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα «Χωρική Ανάλυση και Διαχείριση Περιβάλλοντος»
Ανάλυση μικρομετακινήσεων λόγω σεισμικής δραστηριότητας της νήσου Κεφαλονιάς με διαφορική συμβολομετρία

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από την πλατφόρμα δωρεάν διάθεσης εικόνων Ραντάρ <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> και προέρχονται από τον δορυφόρο SENTINEL 1A σε αΐζουσα τροχιά (Εικόνα 5.1).



Εικόνα 5.1- Πλατφόρμα παραγγελίας εικόνων ραντάρ (Ιδία επεξεργασία)

Οι εικόνες που επιλέχθηκαν είναι τύπου SLC (Single Look Complex) και εμπεριέχουν την πληροφορία της φάσης. Τα αποτελέσματα αναζήτησης, αναφορικά με την περιοχή μελέτης ήταν πολύ λίγα. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν είναι τα εξής:

A/A	ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ	ΤΡΟΧΙΑ	ΤΥΠΟΣ ΕΙΚΟΝΑΣ	ΔΟΡΥΦΟΡΟΣ
1	13/8/2015	ΑΥΞΟΥΣΑ/ ASCENDING	SLC	SENTINEL 1A
2	25/8/2015	ΑΥΞΟΥΣΑ/ ASCENDING	SLC	SENTINEL 1A
3	18/9/2015	ΑΥΞΟΥΣΑ/ ASCENDING	SLC	SENTINEL 1A
4	30/9/2015	ΑΥΞΟΥΣΑ/ ASCENDING	SLC	SENTINEL 1A
5	12/10/2015	ΑΥΞΟΥΣΑ/ ASCENDING	SLC	SENTINEL 1A
6	24/10/2015	ΑΥΞΟΥΣΑ/ ASCENDING	SLC	SENTINEL 1A
7	5/11/2015	ΑΥΞΟΥΣΑ/ ASCENDING	SLC	SENTINEL 1A
8	17/11/2015	ΑΥΞΟΥΣΑ/ ASCENDING	SLC	SENTINEL 1A

9	29/11/2015	ΑΥΞΟΥΣΑ/ ASCENDING	SLC	SENTINEL 1A
10	29/11/2015	ΑΥΞΟΥΣΑ/ ASCENDING	SLC	SENTINEL 1A
11	11/12/2015	ΑΥΞΟΥΣΑ/ ASCENDING	SLC	SENTINEL 1A
12	23/12/2015	ΑΥΞΟΥΣΑ/ ASCENDING	SLC	SENTINEL 1A
13	4/1/2016	ΑΥΞΟΥΣΑ/ ASCENDING	SLC	SENTINEL 1A
14	28/1/2016	ΑΥΞΟΥΣΑ/ ASCENDING	SLC	SENTINEL 1A

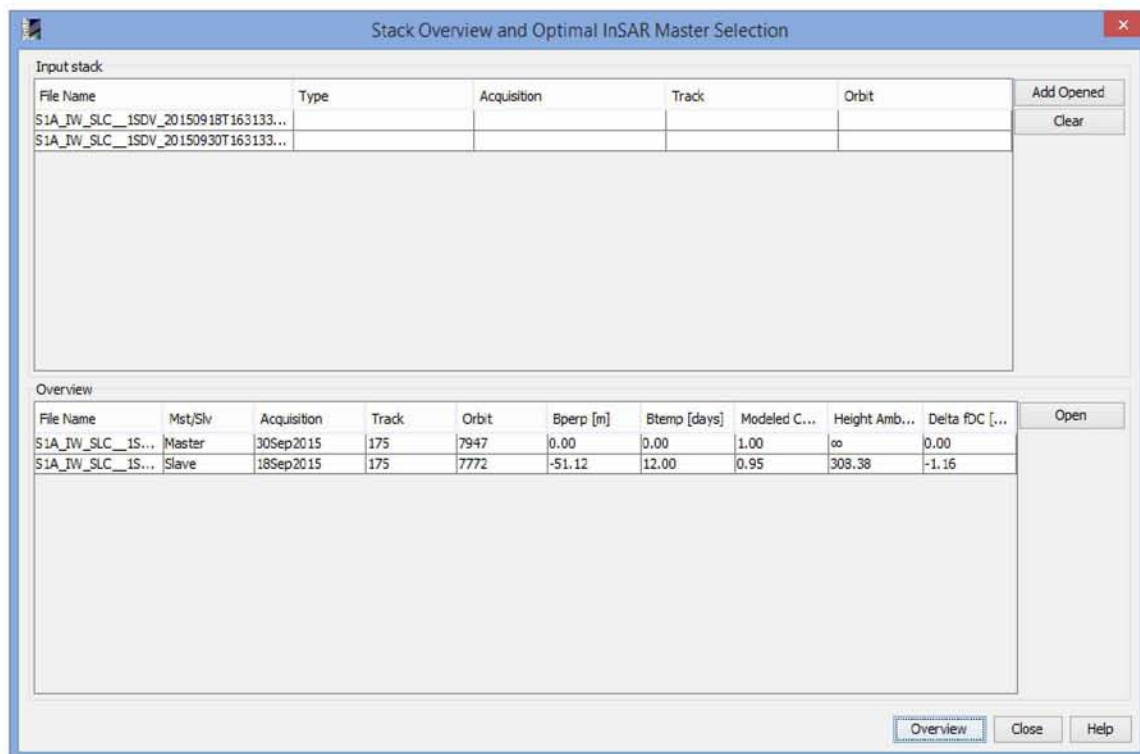
5.2 Επεξεργασία δεδομένων

Η επεξεργασία των δεδομένων πραγματοποιήθηκε στο πρόγραμμα SNAP v. 6.0.0 και μέσω του αλγόριθμου SNAPhu παράχθηκε το ζετύλιγμα της φάσης, τα οποία διατίθενται δωρεάν στο κοινό μέσω της πλατφόρμας του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Διαστήματος/ESA. Παρακάτω αναλύονται τα βήματα της συμβολομετρικής διαδικασίας με τελικό παραγόμενο προϊόν έναν χάρτη μετατοπίσεων της Χερσονήσου της Παλλικής λόγω σεισμικής δραστηριότητας.

5.2.1 Εισαγωγή των δεδομένων

Αρχικά εισάγεται το πρώτο ζεύγος εικόνων και γίνεται έλεγχος της βασικής κάθετης γραμμής και της συνοχής του ζεύγους. Στην Εικόνα 5.2 παρατηρούμε ότι για το ζεύγος με ημερομηνίες λήψης 18 Σεπτεμβρίου 2015 και 30 Σεπτεμβρίου 2015 η βασική κάθετη γραμμή (Bper) είναι ίση με -51,12μ. και η συνοχή του ζεύγους ανέρχεται σε 0.95 (Modeled

Coherence).



Εικόνα 5.2- Στοιχεία ζεύγους εικόνων (Ιδία επεξεργασία)

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει η βασική κάθετη γραμμή (ή το διάνυσμα βάσης) έχει εξαιρετική σημασία καθώς εάν είναι πολύ μικρό καθιστά αδύνατη την ορθή απόδοση των υψομέτρων, ενώ εάν είναι πολύ μεγάλο εντοπίζεται μεγάλη απώλεια συνοχής. Στο συγκεκριμένο ζεύγος παρατηρούμε ότι και το μήκος του διανύσματος βάσης και η τιμή της συνάφειας είναι σε κανονικές τιμές οπότε είναι δυνατή η συνέχιση της επεξεργασίας.

Όλα τα ζεύγη που επιλέχθηκαν πληρούν τις παραπάνω προϋποθέσεις και παρατίθενται παρακάτω:

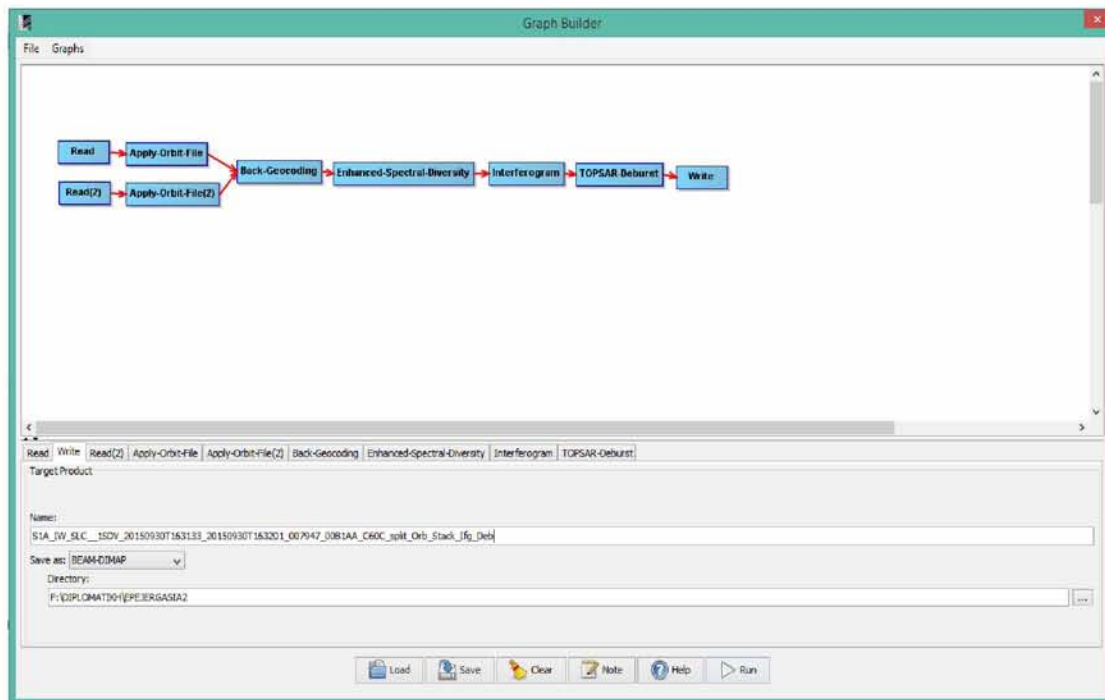
A/A	ΒΑΣΙΚΗ ΚΑΘΕΤΗ ΓΡΑΜΜΗ/ Bper (m)	ΣΥΝΑΦΕΙΑ/ MODELED COHERENCE	ΔΙΑΡΚΕΙΑ ΜΕΤΑΞΥ ΔΗΨΕΩΝ/ Btemp (days)
1	-101,93	0,9	12
2	-51,12	0,95	12
3	-12,85	0,98	12
4	-25,82	0,97	12
5	36,71	0,96	12
6	37,26	0,96	12
7	86,4	0,92	12
8	103,29	0,89	12

ΠΙΝΑΚΑΣ 1 – ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΖΕΥΓΟΥΣ ΕΙΚΟΝΩΝ (ΙΔΙΑ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ)

5.2.2 Ανάλυση δεδομένων

Μέσω του λογισμικού SNAP, πραγματοποιείται η ανάλυση δεδομένων μέσω διαγράμματος ροής εργασιών και το αποδίδεται το σύνολο των παραγόμενων προϊόντων σε τρία στάδια. Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η μέθοδος της Συμβολομετρίας InSAR ώστε να παραχθεί το συμβολόγραμμα και ο χάρτης συνάφειας. Παρατηρείται ότι το παραγόμενο προϊόν περιέχει σε μία εγγραφή τις πληροφορίες που προστέθηκαν σε αυτό το στάδιο (Εικόνα 5.3):

- α) Orb: Παρέχονται οι πληροφορίες σχετικά με την ακριβή θέση του δορυφόρου καθώς και η ταχύτητά του.
- β) Stack: Κάθε στόχος του εδάφους αντιστοιχεί στο ίδιο εικονοστοιχείο τόσο στην κύρια όσο και στην δευτερεύουσα εικόνα.
- γ) Ifg: Συμβολόγραμμα του ζεύγους.
- δ) Deb: Απαλοιφή των μαύρων γραμμών μεταξύ των λωρίδων σε κάθε απεικόνιση.

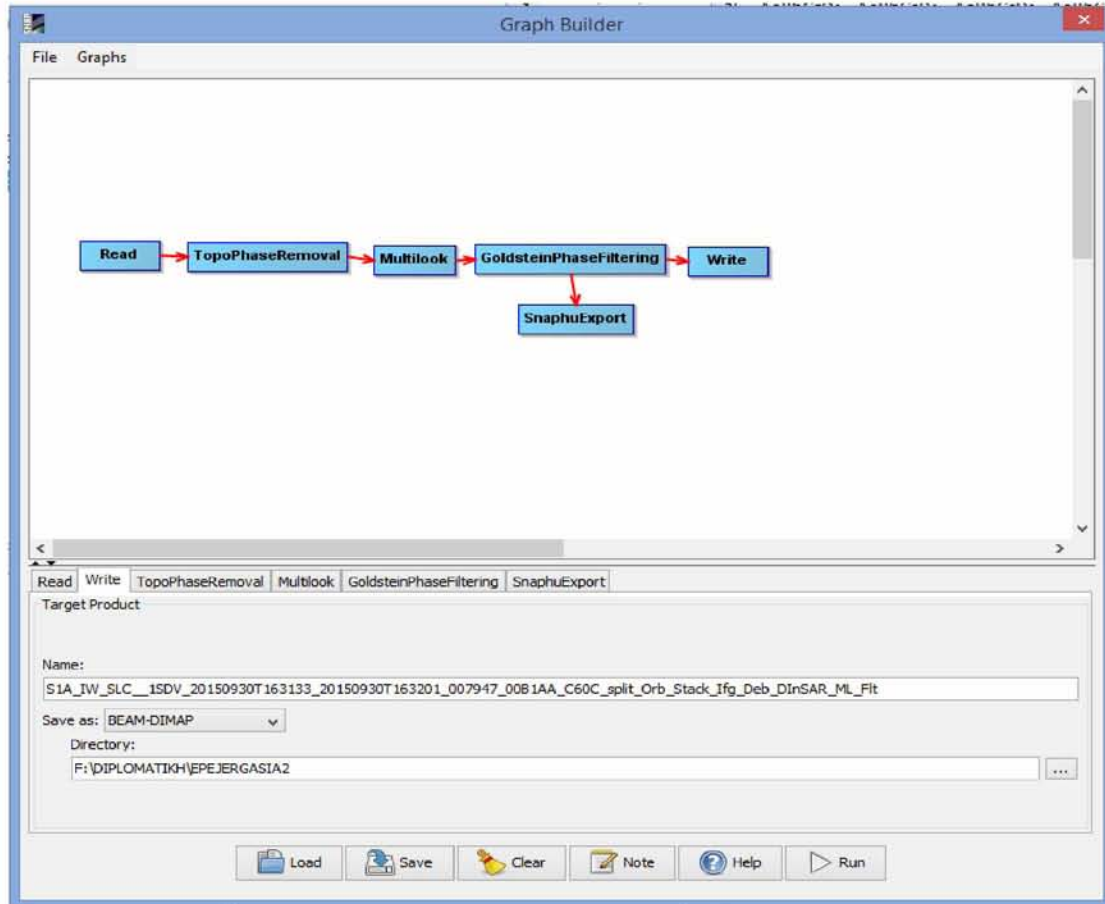


Εικόνα 5.3 - Πρώτο στάδιο επεξεργασίας με εφαρμογή Συμβολομετρίας InSAR (Ιδία επεξεργασία)

Στο δεύτερο στάδιο εφαρμόζεται η μέθοδος της Διαφορικής συμβολομετρίας DInSAR όπου το παραγόμενο προϊόν είναι το διαφορικό συμβολόγραμμα μετατοπίσεων. Και σε αυτήν την περίπτωση το παραγόμενο προϊόν περιέχει σε μία εγγραφή τις πληροφορίες που προστέθηκαν σε αυτό το στάδιο (Εικόνα 5.4):

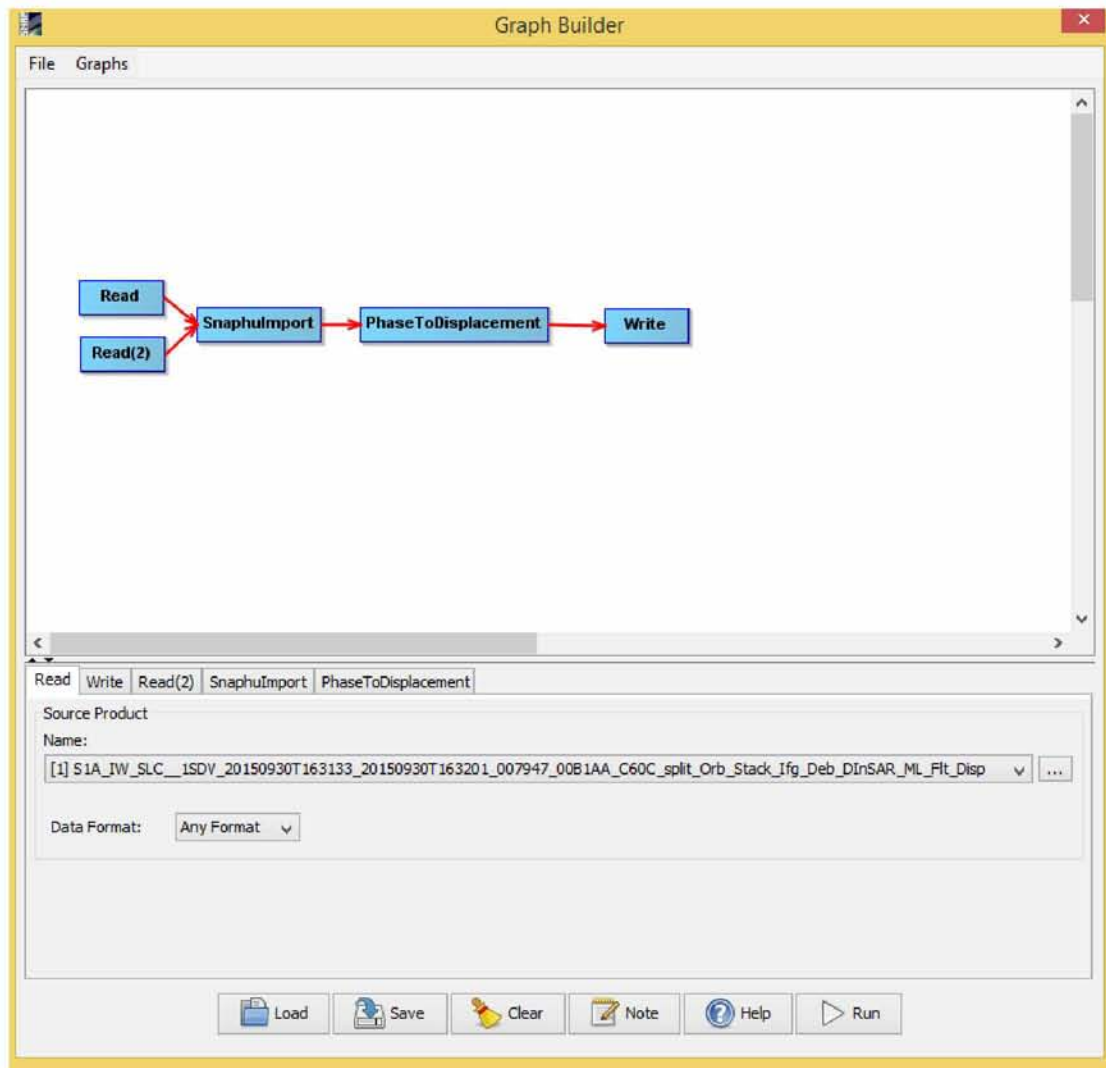
- α) DInSAR: Αφαίρεση της τοπογραφικής φάσης

- β) ML: Αφαίρεση της κηλίδωσης (speckle) των απεικονίσεων και βελτίωση των απεικονίσεων.
- γ) Flt: Φιλτράρισμα του συμβολογράμματος της φάσης για απομάκρυνση του θορύβου.



Εικόνα 5.4 - Δεύτερο στάδιο επεξεργασίας με εφαρμογή Διαφορικής Συμβολομετρίας DInSAR (Ιδια επεξεργασία)

Στο τρίτο στάδιο εισάγεται η «ξετυλιγμένη» φάση και υπολογίζονται οι τιμές μετατόπισης (Εικόνα 5.5).



Εικόνα 5.5 - Τρίτο στάδιο εξαγωγής των τιμών μετατοπίσεων (Ιδία επεξεργασία)

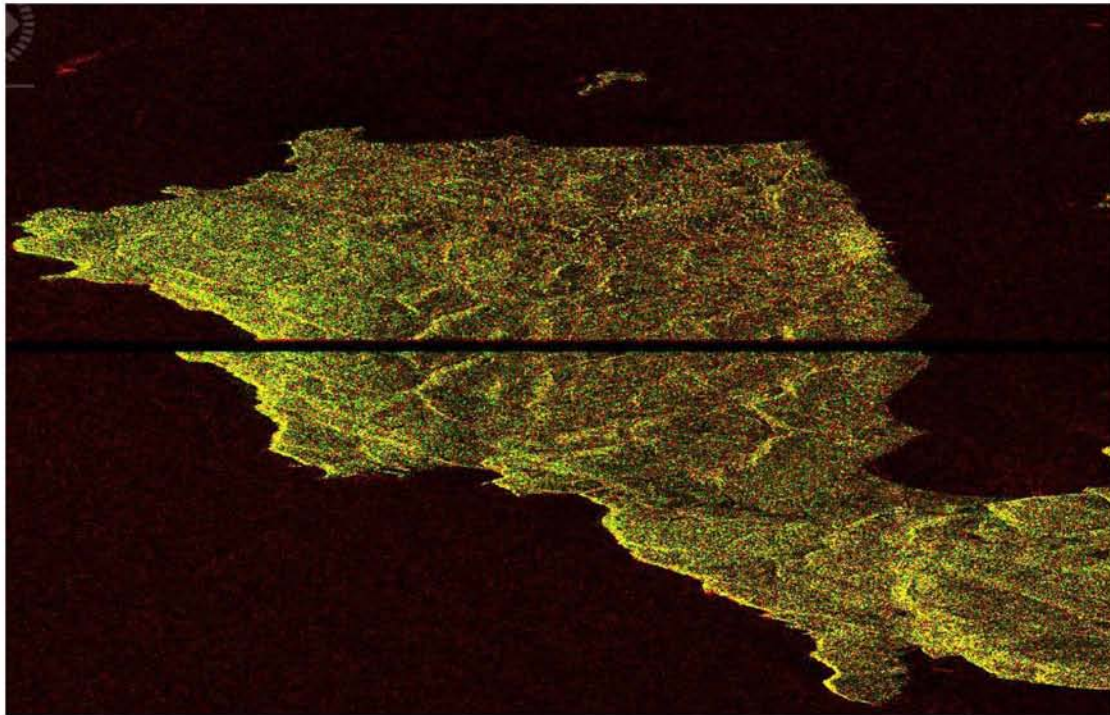
5.2.3 Συμπροσαρμογή των εικόνων

Κατά την διαδικασία της συμπροσαρμογής των εικόνων (Coregistration) γίνεται ουσιαστικά υπέρθεση των εικονοστοιχείων της δευτερεύουσας εικόνας στα εικονοστοιχεία της κύριας. Πραγματοποιείται ανά ζεύγη εικόνων και παράγεται ο χάρτης συνάφειας, όπου τα πιο φωτεινά σημεία υποδεικνύουν υψηλή συνάφεια μεταξύ των επιλεγμένων εικόνων (Εικόνα 5.6).



Εικόνα 5.6- Χάρτης συνάφειας εικόνων (Ιδία επεξεργασία)

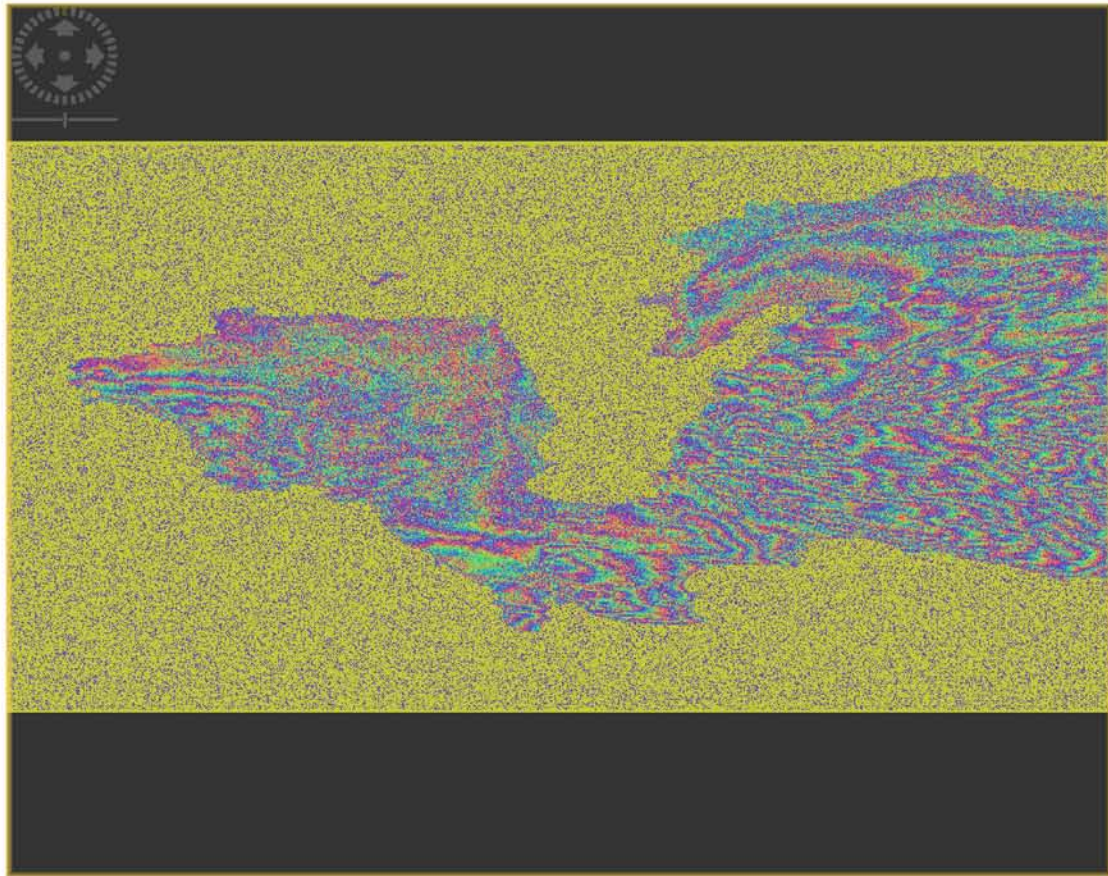
Στην πραγματικότητα τα κοινά εικονοστοιχεία της δευτερεύουσας εικόνας τοποθετούνται στην θέση των αντίστοιχων εικονοστοιχείων της κύριας εικόνας. Η παραγωγή της αντίστοιχης εικόνας RGB θα βοηθήσει να κατανοήσουμε το γεγονός της υπέρθεσης. Αυτό θα συμβεί καθώς τα εικονοστοιχεία της κύριας εικόνας αντιστοιχούν στο κόκκινο χρώμα και τα εικονοστοιχεία της δευτερεύουσας αντιστοιχούν στο πράσινο χρώμα. Το αποτέλεσμα φαίνεται στην Εικόνα 5.7. Η έντονη παρουσία του κίτρινου χρώματος επιβεβαιώνει την ορθή συμπροσαρμογή. Αντίθετα, το κόκκινο χρώμα αποδίδεται στην απουσία συνάφειας λόγω του νερού.



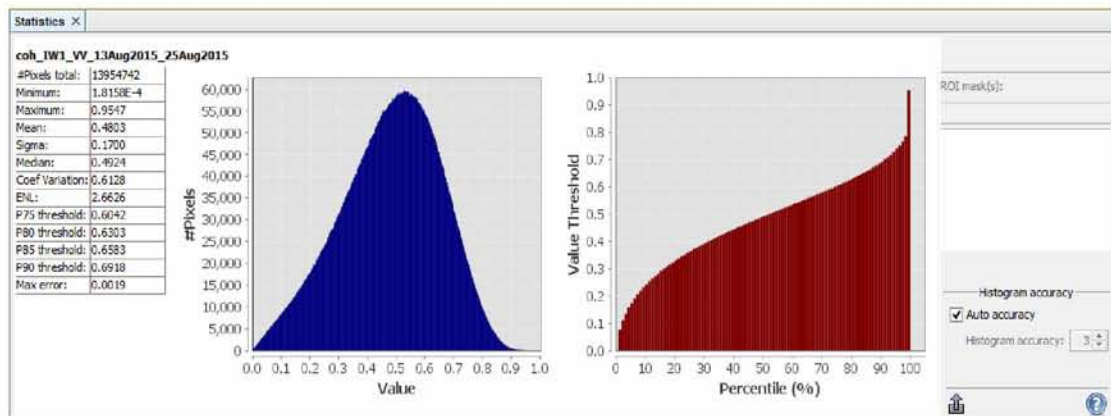
Εικόνα 5.7- Εικόνα RGB (Ιδία επεξεργασία)

5.2.4 Δημιουργία συμβολογράμματος και απομάκρυνση του όρου της τοπογραφίας

Το συμβολόγραμμα αποδίδει την διαφορά φάσης μεταξύ των εικόνων που έχουν ληφθεί σε διαφορετικό χρόνο και υπό ελαφρά διαφορετική γωνία λήψης. Στην περίπτωση των μετατοπίσεων, η αλλαγή στην επιφάνεια αποδίδεται με ομόκεντρους κύκλους (όμοιους με τις ισοϋψείς καμπύλες). Το αρχικό συμβολόγραμμα που παράγεται από το ζεύγος των εικόνα παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.8. Παρατηρείται αρκετός θόρυβος στην εικόνα καθώς η παρουσία της τοπογραφίας είναι έντονη σε κάθε σημείο της περιοχής μελέτης, φαινόμενα τα οποία αποτυπώνονται στην Εικόνα 5.9.

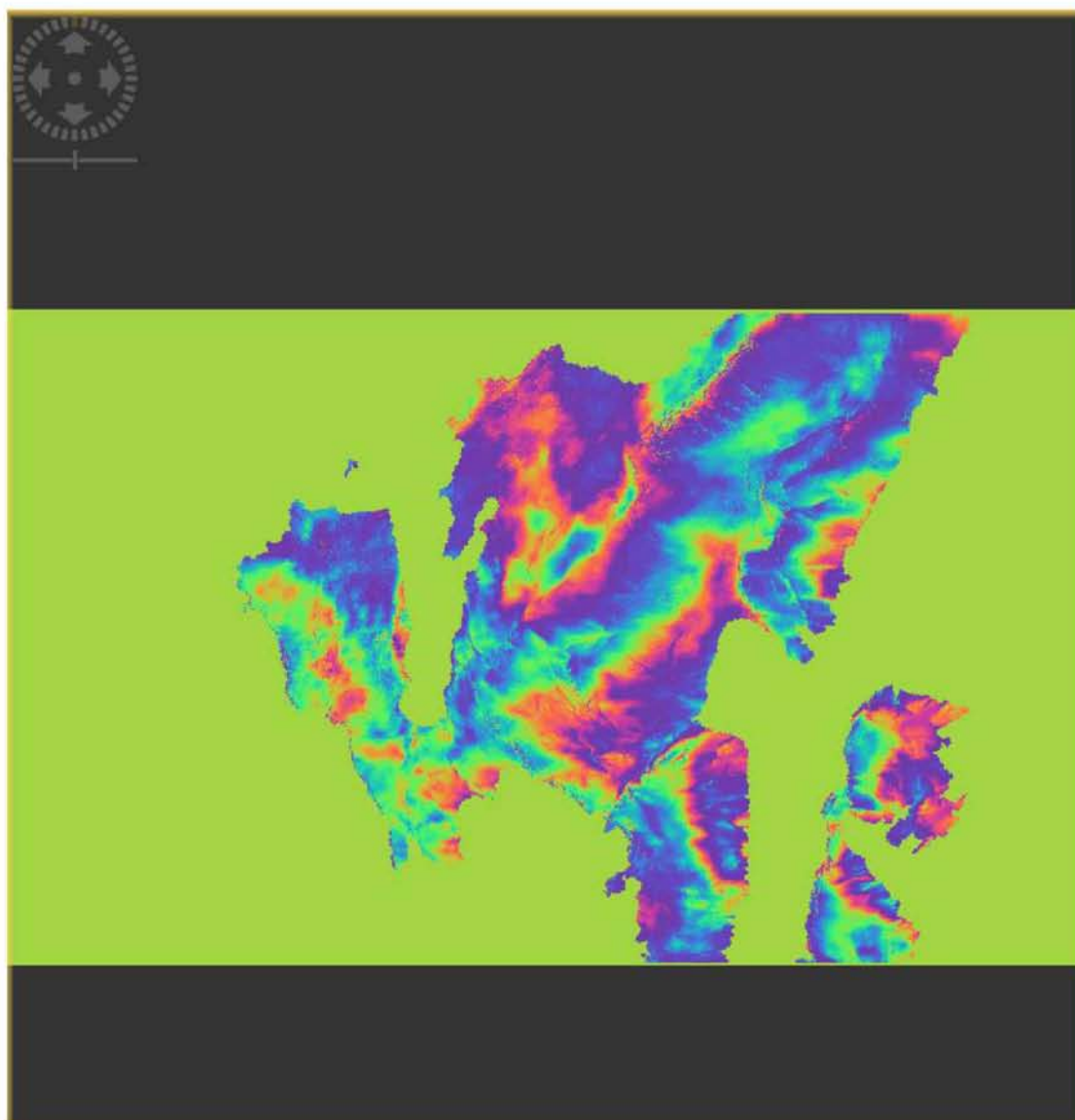


Εικόνα 5.8- Συμβολόγραμμα (Ιδια επεξεργασία)



Εικόνα 5.9- Ιστόγραμμα συνάφειας (Ιδια επεξεργασία)

Στην συνέχεια πραγματοποιείται η απομάκρυνση της τοπογραφικής φάσης και η εφαρμογή του φίλτρου Goldstein με σκοπό την πλήρη αφαίρεση της τοπογραφίας της εικόνας, βελτιώνει την ποιότητα του συμβολογράμματος και συνεισφέρει στο καλύτερο αποτέλεσμα για το στάδιο του ξετυλίγματος της φάσης (Εικόνα 5.10).

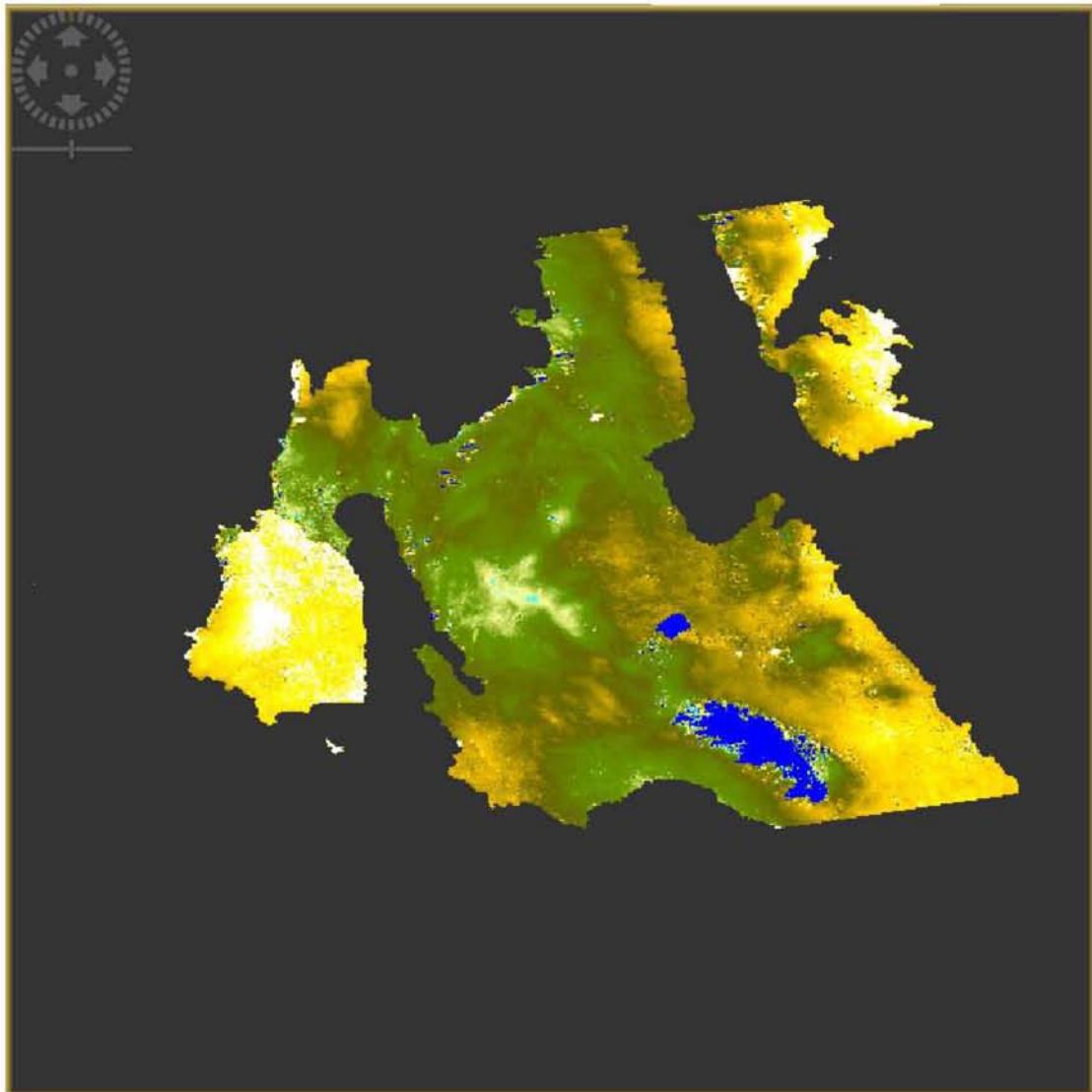


Εικόνα 5.10- Συμβολόγραμμα έπειτα από εφαρμογή φίλτρου και αφαίρεση της τοπογραφικής φάσης
(Ιδία επεξεργασία)

5.2.5 Ξετύλιγμα της φάσης και παραγωγή μετατοπίσεων

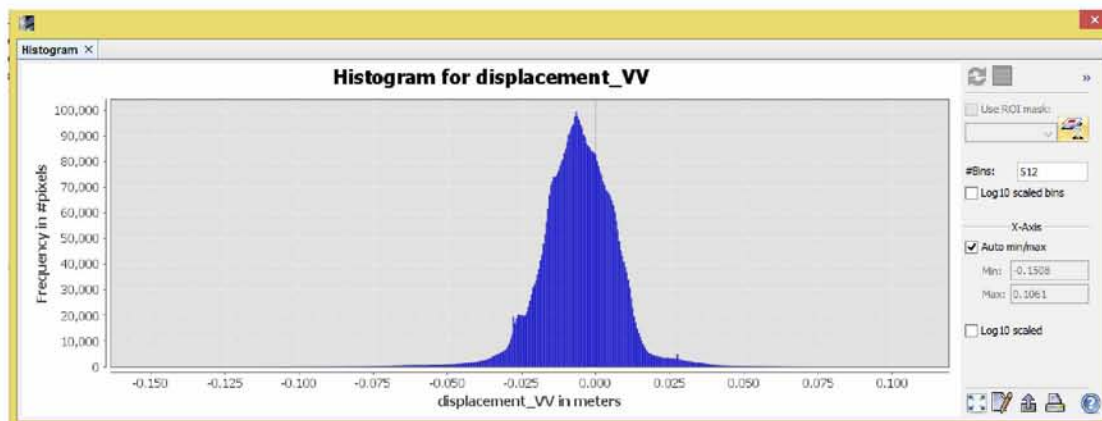
Καθόλη την διάρκεια της επεξεργασίας των δεδομένων όπου απαιτήθηκε, χρησιμοποιήθηκε το Ψηφιακό Μοντέλο εδάφους SRTM 3 Sec. το οποίο έχει μέγεθος εικονοστοιχείου 30 μέτρα και υψομετρική ακρίβεια ≤ 16 μέτρων. Το ίδιο ΨΜΕ χρησιμοποιήθηκε και κατά την διαδικασία ξετυλίγματος της φάσης και εισαγωγής της ξανά στον πρόγραμμα για την συνέχιση της διαδικασίας.

Το ξετύλιγμα της φάσης πραγματοποιήθηκε μέσω του αλγορίθμου SNAPhu και στην συνέχεια μέσω του προγράμματος SNAP έγινε η αποκατάσταση της φάσης.



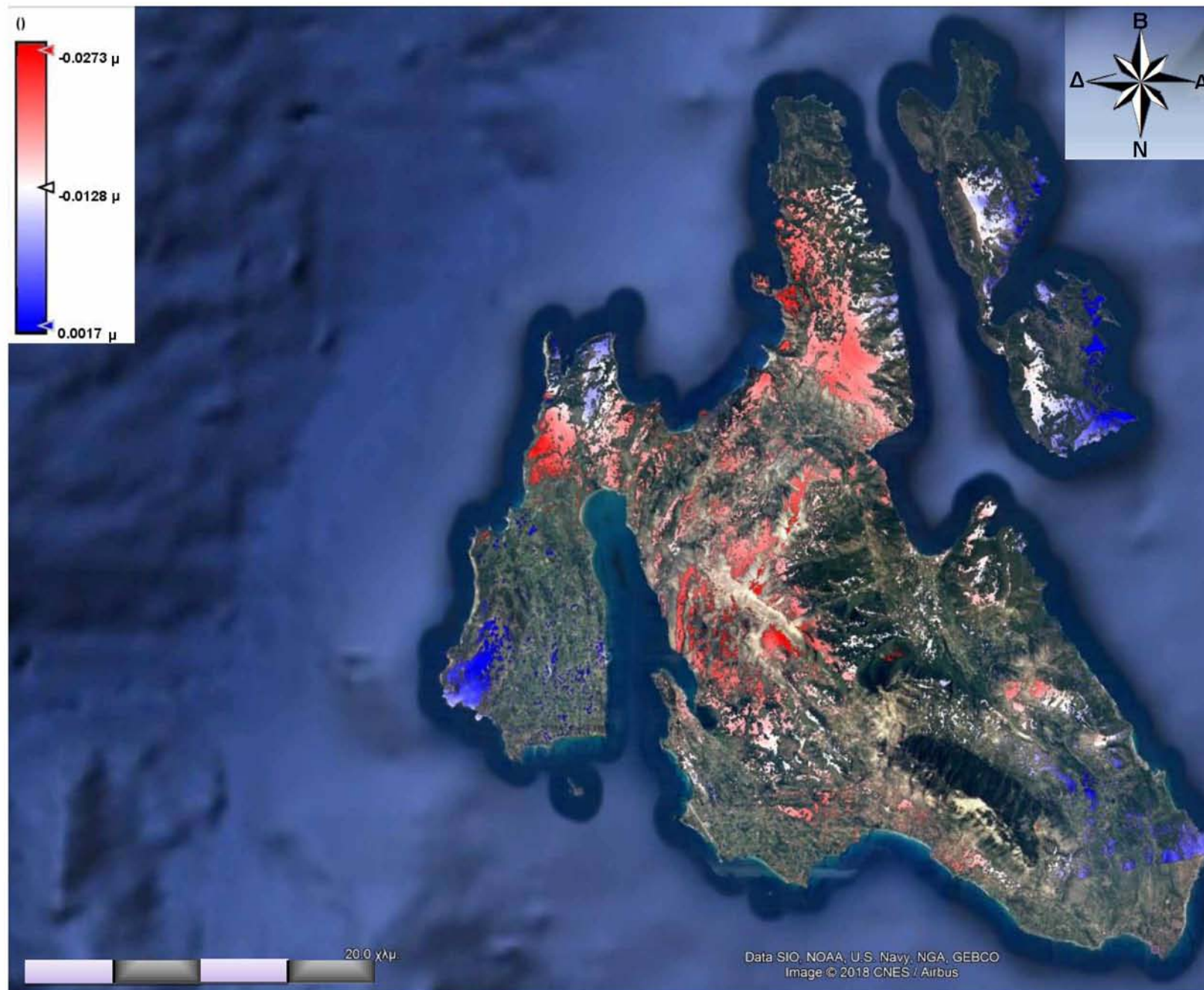
Εικόνα 5.11 – Απόσπασμα μετατοπίσεων ζεύγους (Ιδία επεξεργασία)

Στο παρακάτω ιστόγραμμα μετατοπίσεων παρατηρούμε ότι μετά το ξετύλιγμα της φάσης οι τιμές της μετατόπισης είναι σε μέτρα.



Εικόνα 5.12- Ιστογράμμο τιμών μετατόπισης (Ιδια επεξεργασία)

Τα τελικά αποτελέσματα αποδίδονται στο παρακάτω απόσπασμα.



Εικόνα 5.13 – Εδαφικές μικρομετακινήσεις (Ιδία επεξεργασία)

6 Συμπεράσματα

Η μέθοδος της Συμβολομετρίας αποτελεί στις μέρες το ιδανικό εργαλείο για τον εντοπισμό εδαφικών παραμορφώσεων-μετατοπίσεων προσφέροντας υψηλή χωρική ανάλυση. Πρόκειται για ένα αντικείμενο το οποίο έχει μεγάλο πεδίο εφαρμογών και μπορεί να βοηθήσει στην κατανόηση του υπό μελέτη φαινομένου.

Η παρούσα διπλωματική εργασία, στην οποία χρησιμοποιήθηκαν και αξιοποιήθηκαν δεδομένα της αποστολής SENTINEL 1, αποτελεί μία πρώτη προσέγγιση των δυνατοτήτων της τεχνολογίας της διαφορικής συμβολομετρίας.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης που πραγματοποιήθηκε, αναδεικνύουν το γενικότερο πρόβλημα καταβύθισης της Ευρασιατικής πλάκας κάτω από την Αφρικανική στην περιοχή του Ιονίου. Μεγαλύτερη ακρίβεια στα αποτελέσματα θα επιτευχτεί με την δημιουργία δικτύου επίγειων μετρήσεων GPS σε συνδυασμό με την εφαρμογή της τεχνικής της συμβολομετρίας των σταθερών ανακλαστήρων. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα την παραγωγή Ψηφιακού Υψομετρικού Μοντέλου υψηλότερης Ανάλυσης και σε συνδυασμό με τις δύο τροχιές του δορυφόρου (αύξουσα και φθίνουσα) θα είναι δυνατή η εξαγωγή ακριβέστερων συμπερασμάτων.

Στην παρούσα εργασία αξιοποιήθηκαν δεδομένα της αποστολής Sentinel-1 για την παρακολούθηση των παραμορφώσεων έπειτα από τις ισχυρές σεισμικές δονήσεις της 26 Ιανουαρίου 2014 και 3 Φεβρουαρίου 2014. Η δημιουργία των συμβολογραμμάτων οδήγησε στην δημιουργία των κροσσών συμβολής και κατ' επέκταση στην εκτίμηση των παραμορφώσεων στην υπό μελέτη περιοχή.

Η σύγκριση με δεδομένα υδρολογικά, γεωλογικά κλπ. θα ήταν ενδιαφέρουσα καθώς θα ήταν δυνατή η εμβάθυνση στα αίτια που προκαλούν το φαινόμενο. Η διαχρονική μελέτη εκτίμησης των εδαφικών παραμορφώσεων είναι δυνατόν να προσφέρει δεδομένα τα οποία βοηθούν στην αστική ανάπτυξη της περιοχής. Θα μπορούσε για παράδειγμα να εξαιρεθεί από την μελέτη επέκτασης ενός οικισμού, η περιοχή που εμφανίζει μεγάλες διακυμάνσεις μετατοπίσεων. Μια συνολική εκτίμηση του μεγέθους του προβλήματος και της διαχρονικής του εξέλιξης θα μπορούσε να αξιοποιηθεί στην βελτιστοποίηση κατασκευής έργων υποδομής, πχ μικρομετακινήσεις φραγμάτων, γεφυρών, χωματισμών οδικών αξόνων κλπ.

Προτείνεται η συνέχιση της μελέτης για όλο το νησί και για τα έτη 2000-2010 και νωρίτερα, ώστε να ληφθούν υπόψιν και τα δεδομένα που υπήρχαν τότε για να δοθεί μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα του φαινομένου όπως επίσης να περιληφθούν και δεδομένα όπως ο προσανατολισμός των μετατοπίσεων.

Βιβλιογραφία

1. Γκέντσος, Κ., (μ.δ.) (2013), Εφαρμογή της τεχνικής της συμβολομετρίας για την παραγωγή ψηφιακού μοντέλου εδάφους με χρήση δεδομένων του δορυφόρου SENTINEL-1 και την αξιολόγηση της ακρίβειας του, Θεσσαλονίκη: Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης
2. Δεληκάρου, Δ. (επ.) (2005), Ειδικά Θέματα Δορυφορικής Γεωδαισίας, Αθήνα: ΕΜΠ
3. Ινστιτούτο τεχνικής Σεισμολογίας & Αντισεισμικών Κατασκευών (2008), Ο σεισμός της Αχαΐας – Ηλείας, Θεσσαλονίκη
4. Καρτάλης, Κ. και Φείδας, Χ. (επ.) (2013/2017), Αρχές και Εφαρμογές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης, Θεσσαλονίκη: Τζιόλα.
5. Κασκαρά, Μ. (δ.ε.) (2015), Διαχρονική συμβολομετρία Ραντάρ για την εκτίμηση ρυθμών παραμόρφωσης στην περιοχή της δυτικής Κρήτης για την χρονική περίοδο 1992-21. Σύγκριση με δεδομένα GPS, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
6. Κουκουβέλας, Ι. (επ.) (1998), Τεκτονική Γεωλογία, Αθήνα: Leader Books
7. Μέρτικας, Π. (επ.) (2009), Τηλεπισκόπηση και Ψηφιακή Ανάλυση Εικόνας, Αθήνα: ΙΩΝ
8. Παπαδόπουλος, Γ., Σαχπάζη, Μ., Καραστάθης, Β., Γκανάς, Α., Μιναδάκης, Γ., Μπασκούτας, Ι., Μόσχου, Α., Μουζακιώτης, Α., Ορφανογιαννάκη, Κ., Δασκαλάκη, Ε., Λιακόπουλος, Σ., Παπαγεωργίου και Α., Τριανταφύλλου Ι. (2014), Οι σεισμοί του Ιανουαρίου – Φεβρουαρίου του 2014 στην Κεφαλονιά: Μια πρώτη έκθεση, Αθήνα: Γεωδυναμικό Ινστιτούτο
9. Παπαγεωργίου, Ε. (δ.δ.) (2015), Μελέτη εδαφικής παραμόρφωσης στην εκτίμηση ηφαιστειακής επικινδυνότητας τη χρήσει διαστημικών και γεωφυσικών τεχνικών: Η περίπτωση του ελληνικού ηφαιστειακού τόξου, Αθήνα: Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών
10. Παπαζάχος, Β., Καρακαΐσης, Γ. και Χατζηδημητρίου, Π. (επ.) (2005) Εισαγωγή στη Σεισμολογία, Θεσσαλονίκη: Ζήτη
11. Παπανικολάου, Δ. και Λοΐζος, Σ. (επ.) (2015), Τεκτονική Γεωλογία, Αθήνα: DaVinci
12. Παρχαρίδης, Ι. (2009), Χαρτογράφηση της Εδαφικής Παραμόρφωσης στη περιοχή του νομού Ηλείας με την Χρήση της Διαφορικής Συμβολομετρίας από Δορυφόρους Ραντάρ, Αθήνα: Χαροκόπειο Πανεπιστήμιο Τμήμα Γεωγραφίας
13. Παρχαρίδης, Ι. (επ.) (2015), Αρχές Δορυφορικής Τηλεπισκόπησης Θεωρία και Εφαρμογές, Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών
14. Περάκης, Κ., Φαρασλής, Ι. και Μωυσιάδης, Α. (επ.) (2015), Η Τηλεπισκόπηση σε 13 Ενότητες, Αθήνα: Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών
15. Τσελέντης, Α. (επ.) (1997), Σύγχρονη Σεισμολογία, Τόμος Β΄, Αθήνα: Παπασωτηρίου
16. Τσελέντης, Α. (επ.) (2016), Γενική Σεισμολογία, Τόμος Α΄, Αθήνα: Liberal Books
17. Φουμέλης, μ. (δ.δ.) (2009), Μελέτη επιφανειακής παραμόρφωσης ευρύτερης περιοχής Αθηνών βάσει διαφορικών μετρήσεων GPS και συμβολομετρίας Ραντάρ, Αθήνα: : Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών
18. Gibson, P. (2000), Introductory Remote Sensing, Principles and Concepts, London: Routledge
19. Lillesand, T. and Kiefer, R. (2000), Remote Sensing and Image Interpretation, USA: John Wiley & Sons, Inc.
20. Blahut, R. (2004), Theory of Remote Image Formation, United Kingdom: University Press, Cambridge
21. J. Hu, Z.W. Li, X.L. Ding, J.J. Zhu, L. Zhang, Q. Sun (2013) Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review, Earth-Science Reviews (2014), 1-17

22. Waldir R. Paradella, Alessandro Ferretti, José C.Mura, Davide Colombo, Fabio F. Gama, Andrea Tamburini, Athos R. Santos, FabrizioNovali, MauricioGal, Paulo O. Camargo, Arnaldo Q. Silva,Guilherme G. Silva, Aristotelina Silva, Leonardo L. Gomes (2014) Mapping surface deformation in open pit iron mines of Carajás Province(Amazon Region) using an integrated SAR analysis, *Engineering Geology* (2015), 61-78
23. Rucci, A. Ferretti, A. Monti Guarnieri, F. Rocca (2010) Sentinel 1 SAR interferometry applications: The outlook for submillimeter measurements, *Remote Sensing of Environment* (2012), 156-163
24. Alberto Foni, David Seal (2002) Shuttle Radar Topography Mission: an innovative approach to shuttle orbital control, *Acta Astronautica* 54 (2004) 565 – 570
25. Chengsheng Yang, Zhong Lu, Qin Zhang, Chaoying Zhao, Jianbing Peng, Lingyun Ji (2017) Deformation at longyao ground fissure and its surroundings, north China plain, revealed by ALOS PALSAR PS-InSAR *Int J Appl Earth Obs Geoinformation* 67 (2018) 1–9
26. Won-Jin Lee, Zhong Lu, Hyung-Sup Jung and Lingyun Ji (2017) Measurement of small co-seismic deformation field from multitemporalSAR interferometry: application to the 19 September2004 Huntoon Valley earthquake, *GEOMATICS, NATURAL HAZARDS AND RISK*, (2017) 1-17
27. George Papathanassiou, Sotirios Valkaniotis, Athanassios Ganas (2016) Evaluation of the macroseismic intensities triggered by the January/February 2014 Cephalonia, (Greece) earthquakes based on ESI-07 scale and their comparison to 1867 historical event, *Quaternary International* 451 (2017) 234-247
28. Athanassios Ganas¹ and Tom Parsons² (2008) Three-dimensional model of Hellenic Arc deformation and origin of the Cretan uplift *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, VOL. 114, B06404 (2009) 1-14
29. Didier Massonnet Kurt L. Feigl (1998) RADAR INTERFEROMETRY AND ITS APPLICATION TO CHANGES IN THE EARTH'S SURFACE *Reviews of Geophysics*3,6 , American Geophysical Union (1998) 441-500
30. George Papathanassiou, Sotiris Valkaniotis, Athanassios Ganas, Nikos Grendas, Elisavet Kollia (2016)The November 17th, 2015 Lefkada (Greece) strike-slip earthquake: Field mapping of generated failures and assessment of macroseismic intensity ESI-07 *Engineering Geology* 220 (2017) 13–30